



Anna-Maria Nieminen

Murskatun betonin hyödyntäminen uusiokiviaineeksena betonissa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 23. marraskuuta 2015

Valvoja: Professori Jari Puttonen, Aalto-yliopisto

Ohjaaja: TkL Hannu Pyy, Vahanen Oy

Diplomityön tiivistelmä

Tekijä Anna-Maria Nieminen

Työn nimi Murskatun betonin hyödyntäminen uusiokiviaineksena betonissa

Laitos Rakennustekniikka

Professuuri Talonrakennustekniikka

Professuurikoodi RAK.thes

Työn valvoja Professori Jari Puttonen, Aalto-yliopisto

Työn ohjaaja(t)/Työntarkastaja(t) TkL Hannu Pyy, Vahanen Oy

Päivämäärä 23.11.2015

Sivumäärä 77 & liitteet

Kieli suomi

Tiivistelmä

Työssä tutkittiin murskatun betonin käyttöä uusiokiviaineksena betonin valmistuksessa. Suomessa betonimursketta hyödynnetään pääosin vain maarakentamisessa. Murskeen hyödyntäminen uusiobetonin valmistuksessa on järkevää ja suositeltavaa, koska betoni saadaan uusiomateriaalina takaisin kiertoon.

Työssä on selvitetty, mitkä tekijät vaikuttavat uusiobetonin valmistukseen ja ominaisuuksiin. Betonimurske uusiokiviaineksena poikkeaa luonnonkiviaineksesta erityisesti suuremman vedenimukykynsä ja alhaisemman tiheydensä vuoksi. Kyseiset ominaisuudet on huomioitava, sillä ne vaikuttavat myös uusiobetonin ominaisuuksiin. Kirjallisuudessa on esitetty eri tekijöitä, jotka parantavat uusiobetonin ominaisuuksia verrattuna tavanomaiseen betoniin.

Diplomityössä määritettiin kokeellisesti lähdemateriaalin eli purettavan kohteen betonin lujuutta sekä selvitettiin uusiokiviaineksen valmistusta ja ominaisuuksia. Lisäksi kokeellisessa tutkimuksessa valmistettiin koebetoneita, joissa luonnonkiviainesta korvattiin uusiokiviaineksella eri prosenttiosuuksin. Uusiobetoneille tehtiin tuoreen massan sekä kovettuneen betonin ominaisuuksien määritykset, ja niitä verrattiin vertailubetonin ominaisuuksiin.

Työn tuloksena todetaan, että murskatun betonin hyödyntäminen betonin valmistuksessa on mahdollista. Työssä laadittiin betonisen purkujätteen lajittelulle lujuuteen perustuva luokitus, koska lähdemateriaalin laatu vaikuttaa uusiobetonin ominaisuuksiin. Uusiokiviaineksen laatuluokittelu ja uusiobetonin valmistusprosessin kehittäminen parantavat betonin ominaisuuksia. Siten uusiokiviaineksen hyödyntäminen on mahdollista myös korkeamman vaatimustason betonien valmistuksessa.

Avainsanat Betoni, kierrätys, uusiokiviaines, uusiobetoni, betonimurske



Abstract of master's thesis

Author Anna-Maria Nieminen

Title of thesis Use of crushed concrete as a recycled concrete aggregate

Department Civil and Structural Engineering

Professorship Structural Engineering and
Building Physics

Code of professorship RAK.thes

Thesis supervisor Professor Jari Puttonen

Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) Mr. Hannu Pyy, (Lic.Sc)

Date 23.11.2015

Number of pages 77 & annexes

Language Finnish

Abstract

The aim for this thesis was to research, how to use crushed concrete as a recycled concrete aggregate (RCA) to produce concrete. In Finland, crushed concrete is mainly utilized in road construction, as a backfill in trenches etc. It is important to develop the reuse of construction and demolition waste (C&D-waste) by the production of recycled concrete (RC).

There are many factors that influence the production and mechanical properties of recycled concrete. Crushed concrete as a recycled concrete aggregate has higher water absorption and lower density than natural aggregates. Those properties have to be noticed, because they affect properties of the concrete as well. There are several methods to improve the quality of recycled concrete compared to normal concrete.

The experimental part of this thesis consisted of strength evaluation of concrete structures in buildings to be demolished. Recycled concrete aggregate has produced by crushing and sieving demolition concrete waste and properties of recycled concrete aggregate were evaluated. In addition, five different recycled concretes were made and properties of concrete were researched and compared to normal concrete.

As a result of this thesis it is found that utilizing the crushed concrete as a recycled concrete aggregate in concrete production is possible and recommendable. The classification for recycled concrete aggregates was created based on the strength of source concrete. Properties of recycled concrete can be improved by developing the production and classification.

Keywords Concrete, recycling, reuse, recycled concrete aggregate, RCA, recycled aggregate concrete, crushed concrete

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Vahanen Oy:lle. Työn on rahoittanut Rakennustuotteiden Laatu Säätiö, Kuusakoski Oy sekä Ruskon Betoni Oy.

Haluan kiittää työn valvojana toiminutta professori Jari Puttosta neuvoista ja kommentista sekä professori Andrzej Cwirzeniä neuvoista diplomityön alkuvaiheessa.

Kiitokset ohjausryhmälle Vahanen Oy:ssä. Haluan kiittää TkL Hannu Pyytä työn ohjauksesta, innostamisesta aiheeseen sekä asiantuntevista näkemyksistä. Lämpimät kiitokset työn ohjaukseen osallistumisesta ja asiantuntevista neuvoista: DI Mika Oikarille erityisestä tuesta ja kannustuksesta työn eri vaiheissa sekä FM Jarno Komulaiselle ja DI Petri Mannoselle.

Haluan kiittää Ruskon Betoni Oy:n Mikko Vasamaa asiantuntevista neuvoista betonin valmistukseen liittyen sekä Ruskon Betoni Oy:n Kivenlahden tehdasta koebetoneissa käytetyistä kiviaineksista. Kiitokset Kuusakoski Oy:lle ja Purkupiha Oy:lle asiantunteuksesta rakennusten purkuun liittyen sekä kokeellisessa tutkimuksessa käytetystä betonimurskeesta. Haluan kiittää avusta kokeellisessa tutkimuksessa Aalto-yliopiston betonilaboratorion henkilökuntaa, erityisesti Jukka Piirasta ja Lauri Sipilää, sekä tielaboratorion henkilökuntaa. Kiitokset Hannu-isälleni avusta valumuottien valmistuksessa.

Kiitokset kaikille työtovereilleni Vahasella tsemppauksesta ja tuesta diplomityön tekemiseen, erityiskiitos Tuomas, Saku ja Sonja.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni kaikesta tuesta ja kannustuksesta, joita olen opiskeluun ja diplomityön tekemiseen saanut.

Espoossa 23.11.2015

Anna-Maria Nieminen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo.....	5
1 Johdanto.....	7
2 Kierrättäminen betoniteollisuudessa	8
3 Murskattu betoni uusiokiviaineena.....	14
3.1 Uusiokiviaineksen valmistus ja ominaisuudet	14
3.1.1 Valmistus	14
3.1.2 Ominaisuudet.....	17
3.2 Kokeellinen tutkimus	22
3.2.1 Yleistä	22
3.2.2 Lujuuskokeet rakennekoekappaleista	22
3.2.3 Betonimurskeen ominaisuudet ja laatu	28
3.3 Uusiokiviaineksen ominaisuuksien optimointi betonituotannon tarpeisiin	34
3.3.1 Purkujäte raaka-aineena	34
3.3.2 Uusiokiviaineksen valmistus.....	36
4 Uusiobetoni.....	39
4.1 Uusiobetonin valmistus ja ominaisuudet	39
4.1.1 Uusiobetonin koostumus ja valmistus	39
4.1.2 Uusiobetonin ominaisuudet.....	41
4.2 Uusiobetonin kokeellinen tutkimus	46
4.2.1 Yleistä	46
4.2.2 Koejärjestelyt.....	48

4.2.3	Koetulokset	59
4.2.4	Koetulosten tarkastelu.....	63
4.3	Tutkimustulosten hyödyntäminen uusiobetonin tuotannossa	68
5	Johtopäätökset.....	70
	Lähdeluettelo	73
	Liiteluettelo	77
	Liitteet	

1 Johdanto

Rakennusten purkaminen on yleistynyt, jolloin myös purkujätteen määrä on kasvanut. Samaan aikaan kierrätettävyydelle on asetettu tiukempia tavoitteita kaikille Euroopan unionin valtioille. Suomessa betonijätteen kierrätys rajoittuu tällä hetkellä hyödyntämiseen maarakennuksessa. Tutkimuksen tavoitteena on kehittää betonijätteen uudelleenkäyttöä hyödyntämällä betonimursketta uusiokiviaineeksena betonissa.

Betonimurskeen hyötykäyttöä uusiokiviaineeksena on tutkittu paljon viime vuosikymmeninä. Tutkimuksissa on osoitettu ominaisuudet, joissa uusiokiviaines eroaa luonnonkiviaineesta. Tällaisia ominaisuuksia ovat ennen muuta vedenimukyky, tiheys ja rakeiden koostumus. Tutkimuksissa on havaittu, että uusiokiviaineen lähdemateriaalin (purkubetoni) laadun vaikuttavan osaltaan uusiobetonin ominaisuuksiin. Työn tavoitteena on esittää betoniselle purkujätteelle luokittelu, jotta uusiobetonissa voidaan käyttää sen lujuustavoitteita vastaavaa uusiokiviainesta.

Uusiobetonin ominaisuuksien heikentyminen suhteessa tavanomaiseen betoniin on todettu aiheutuvan uusiokiviaineen suuremmasta vedenimukyvystä. Uusiokiviaineen suuri vedenimukyky aiheutuu sen koostumuksesta, sillä uusiokiviainesrae koostuu kiven lisäksi huokoisesta sementtipastasta. Vedenimukykyä voidaan kuitenkin hallita usein eri menetelmin. Työn tavoitteena on löytää vedenimukyvyn tasaamiseksi menetelmä, jota voitaisiin hyödyntää uusiobetonin tuotannossa sen ominaisuuksien parantamiseksi.

Diplomityön kokeellisissa tutkimuksissa on määritetty purkubetonin lujuutta, arvioitu uusiokiviaineen valmistusta ja ominaisuuksia sekä valmistettu vertailubetonin lisäksi koebetoneita ja vertailtu niiden ominaisuuksia. Koebetoneita valmistettiin viisi erilaista siten, että painotettiin karkeimpien uusiokiviaineslajitteiden käyttöä betonin koostumuksen suunnittelussa. Koebetoneissa uusiokiviainesta on käytetty korvaamaan luonnonkiviainesta maltillisesti (välillä 5,1–13,8 %). Tavoitteena on löytää uusiobetonille koostumus, joka on mahdollisimman hyvin sovellettavissa tuotantoon.

Työssä tutkitaan murskatun betonin hyödyntämistä uusiokiviaineeksena. Myös muita materiaaleja, kuten tiilimursketta ja lasimurskaa, on käytetty uusiokiviaineeksena, mutta niiden käyttöä ei ole tutkittu tässä työssä. Kokeellisessa osuudessa lisäaineiden vaiku-

tusta uusiobetonin ominaisuuksiin ei tutkittu. Myöskään betonin säilyvyysominaisuuksia ei koebetoneissa ole tutkittu.

Murskatun betonin uudelleenkäyttöä maarakennustarkoituksiin on tutkittu paljon Suomessa. Maarakennukseen soveltuvan murskeen valmistusprosessi ja ominaisuuksien vaatimukset on esitetty standardeissa. Ohjeistuksia ja prosesseja voitaisiin soveltaa myös betonin uusiokiviaineksen valmistuksessa.

2 Kierrättäminen betoniteollisuudessa

Suomessa syntyi jätettä vuonna 2013 hieman yli 98 miljoonaa tonnia. Sektoreittain jaoteltuna määrällisesti eniten jätettä vuonna 2013 syntyi kaivostoiminnasta ja louhinnasta, mutta toiseksi eniten rakentamisessa. Vuonna 2013 rakentamisessa syntynyt jättemäärä oli noin 15,1 miljoonaa tonnia. Kokonaisuudessaan jätteiden hyödyntämisaste vuonna 2013 on jäänyt vajaaseen 16 prosenttiin. Kiviainesten kierrätys on jäänyt jälkeen muiden jättemateriaalien hyödyntämisestä, koska kiviainekset pääasiassa läjitetään. (Suomen virallinen tilasto 2013.)

Euroopan parlamentin ja neuvoston jätedirektiivi 2008/98/EY on annettu vuonna 2008 ja sen tavoitteena on keskeyttää jätteiden syntyminen taloudellisen toiminnan ja kasvun väistämättömänä sivutuotteena hyödyntäen nykyaikaista tekniikkaa ja huolellista jätehuoltoa. Direktiivissä on asetettu kierrätykselle ja jätteiden hyödyntämiselle tavoite, jossa vuoteen 2020 mennessä rakennus- ja purkujätteestä on kierrätettävä tai hyödynnettävä 70 prosenttia. (Parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EY.)

Betonijätteen kierrätys

Betonijätettä syntyy Suomessa vuosittain arviolta vajaa miljoona tonnia. Jättemäärästä hyötykäytetään noin 70 prosenttia, pääosin maarakentamiseen. Purkamisessa syntyvän betonijätteen koostumus ja laatu määräytyvät purkukohteen, purkutarkkuuden ja toimintoketjun toiminnan mukaisesti. Purkubetonin tekniset ominaisuudet ja ympäristökelpoisuus on varmistettava ennen uudelleenkäyttöä. Esimerkiksi rakenteiden sisältämät haitalliset aineet voivat vaikuttaa purkubetonista valmistettavan murskeen ympäristökelpoisuuteen. (Pajukallio ym. 2011.)

Mikäli betonista purkujätettä halutaan hyödyntää murskeena, purkukohteesta tulee laatia huolellinen purkusuunnitelma, jossa arvioidaan betonijätteen soveltuvuus hyödynnettäväksi ja varmistetaan ympäristökelpoisuus. Suunnitelmassa tulee kuvata kohteen historia, aiempi toiminta, käytetyt rakennusmateriaalit ja mahdolliset kohteessa olevat haitalliset aineet. Suunnitelmassa kuvataan lisäksi purkumenetelmät sekä betonisen purkujätteen lajittelu ja varastointi. (Pajukallio ym. 2011.)

Purkujätteen määrä on kasvussa, koska rakennusten purkaminen on yleistynyt sekä Suomessa että muualla maailmassa. Useat peruskorjauksissa olevat rakennukset ovat tekniikaltaan tai toiminnallisuudeltaan jääneet jälkeen yleisestä kehityksestä, tai eivät vastaa enää nykytarpeisiin. Muutosten toteuttaminen ei ole aina mahdollista tai järkevää, joten viime vuosina enenevässä määrin rakennuksia on päädytty purkamaan uudisrakennusten tieltä. Vanhat koulut ovat tyypillinen esimerkki siitä, että korjaamisen sijaan päädytään usein purkamaan vanha ja rakentamaan tilalle uusi nykytarpeita paremmin vastaava koulu. Lähiöiden ostoskeskuksia, peruskorjattavia toimistorakennuksia sekä asuinkerrostaloja on myös purettu, jotta tontin ala saadaan tehokkaampaan käyttöön, esimerkiksi uusien korkeampien rakennusten avulla. Toisinaan myös tuotantorakennuksia puretaan, koska useiden yritysten tuotanto on tänä päivänä ulkomailla.

Useimmat peruskorjauksissa olevat rakennukset on rakennettu 70- ja 80-luvuilla. Betonia on tuolloin käytetty paljon rakennusmateriaalina, kuten kantavissa rakenteissa tai betonielementteinä. Betonin osa-aineiden laadun merkitys valmiin betonin ominaisuuksiin on ollut tiedossa ja betonin laatua on ohjattu. Yleiskäsityksenä on, että kyseisinä vuosikymmeninä rakentamisessa käytetty betoni on ollut jo alun perin hyvälaatuista. Lisäksi tänä päivänä arvioitaessa betonirakenteiden lujuudet ovat kokemuksiin perustuen suunnittelulujuuksia korkeampia (Pyy 2015). Betonin tavoitelujuus vastaa lujuutta 28 vuorokauden jälkeen valusta. Lujuudenkehitys jatkuu kuitenkin vielä tämänkin jälkeen. Kun 70- tai 80-luvun rakennuksia puretaan, lisääntyy hyvälaatuisen betonijätteen määrä merkittävästi. Näin ollen on syytä hyödyntää betonijäte mahdollisimman hyvin uudelleen.

Viranomaisvaatimukset ja standardit

Betonijätteen kierrätystä ohjaa ja säätelee Suomessa useat eri lait ja asetukset. Jätelain (646/2011) tarkoituksena on ehkäistä jätteistä aiheutuvaa vaaraa ja haittaa, vähentää

jätteen määrää ja haitallisuutta sekä edistää luonnonvarojen kestäväää käyttöä. Jätelaissa määritelty perusperiaate on etusijajärjestys, jota on noudatettava kaikessa toiminnassa mahdollisuuksien mukaan. Etusijajärjestykseen perustuen ensisijaisesti syntyvän jätteen määrää ja haitallisuutta on vähennettävä. Jos jätettä syntyy, ensisijaisesti on valmisteltava jäte uudelleenkäyttöä varten tai toissijaisesti kierrätettävä se. Jos kierrätys ei ole mahdollinen, jäte on hyödynnettävä muulla tavoin, esimerkiksi energiana. Jos hyödyntäminen ei ole mahdollista, jäte on loppukäsiteltävä. (JL 646/2011.)

Jäteasetuksen (179/2012) mukaan rakennus- ja purkujätteen määrän ja haitallisuuden vähentäminen siten, että käyttökelpoiset esineet ja aineet käytetään uudelleen ja rakennus- ja purkujätettä syntyy mahdollisimman vähän. Jäteasetuksessa määritellään myös eri jätelajit, joille tulee järjestää erilliskeräys siten, että mahdollisimman suuri osa jätteestä voidaan valmistella uudelleenkäyttöön tai kierrättää. Jäteasetuksessa luokitellaan myös vaarallinen jäte ja sen keräyksessä huomioon otettavat asiat. (VNa 179/2012.)

Betonimurskeen hyödyntämistä maarakentamisessa on säädetty asetuksessa eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (VNa 591/2006) sekä ympäristönsuojelulaissa (527/2014). Betonimurskeen hyödyntämiseen maarakennuskäytössä ei tarvita ympäristönsuojelulain mukaista ympäristölupaa, jos jätteen laadunhallinta ja hyödyntäminen järjestetään ns. Mara-asetuksen (VNa 591/2006) mukaisesti. Mara-asetuksessa on esitetty betonimurskeen laatuvaatimukset ja jätteen laadunhallinta.

Maa- ja vesirakentamisessa sekä tierakenteissa käytettävien sitomattomien ja hydraulisesti sidottujen kiviainesten ominaisuudet on määritelty eurooppalaisessa standardissa EN 13242 + A1. Standardi asettaa vaatimuksen sille, että maarakennuskäyttöön hyödynnettävän betonimurskeen tulee olla CE-merkittyä. (SFS 2008b.)

Betonimurskeen maarakennuskäytön laadunhallintajärjestelmälle on laadittu kansallinen standardi 5884, joka määrittelee, miten betonteollisuudessa tai rakennusten lajittelevassa purussa syntyvä betonijäte jalostetaan betonimurskeeksi, joka täyttää maarakentamisen asettamat tekniset ja ympäristövaatimukset. (SFS 2001.)

Uusiokiviaines

Purkamisen yleistyessä on kehitettävä materiaalien kierrätystä ja uusiokäyttöä. Uusiokiviaines terminä tarkoittaa kiviainesta, joka on valmistettu aikaisemmin rakentamisessa käytetystä, epäorgaanisesta materiaalista (BY 43 2008). Uusiokiviaineksena voidaan käyttää murskattuina erilaisia materiaaleja, kuten betonia, tiiltä ja lasia. Betonista valmistettua uusiokiviainesta kutsutaan käsitteellä *recycled concrete aggregate* (RCA), joka vapaasti käännettynä tarkoittaa betonista uusiokiviainesta. Muille uusiokiviaineksille on käytössä yleistermi *recycled aggregate* (RA). (Dhir & Paine 2007.) Tässä diplomityössä uusiokiviaineksella tarkoitetaan murskatusta betonista valmistettua kiviainesta (RCA). Tässä työssä ei ole tutkittu muista raaka-aineista valmistettua uusiokiviainesta.

Yleisimmin uusiokiviaineksena betonissa käytetään murskattua betonia, joka saa sisältää standardin mukaisesti pieniä määriä muita epäorgaanisia materiaaleja, kuten tiiltä. Murskattua tiiltä, tiililaattoja ja muita vastaavia materiaaleja käytetään uusiokiviaineksena, mutta mikäli tiilimurskeen osuus uusiokiviaineksessa on erittäin korkea, saatetaan joukkoon lisätä betonimursketta ominaisuuksien parantamiseksi. Asfalttia voidaan käyttää betonissa uusiokiviaineksena, mutta sen on tutkittu alentavan merkittävästi betonin lujuutta. (Dhir & Paine 2007.)



Kuva 1. Betonista purkujätettä, jonka seassa on muita materiaaleja, joista saattaa aiheutua epäpuhtauksia murskattaessa betonilohkareet uusiokiviainekseksi.

Betonin tuotannossa uusiokiviaineksena voidaan käyttää myös lasimursketta. Tutkimuksessa on testattu lasimurskeen käytön vaikutuksia betonin ominaisuuksiin. Lasimursketta on korvattu eri prosenttiosuuksilla ja eri lajitteina (hieno ja karkea). Tutkimuksessa havaittiin, että lasin käyttö heikentää betonissa sekä tuoreen että kovettuneen betonin ominaisuuksia. Kuitenkin luonnonkiviainesta korvattaessa maltillisesti (maksimissaan 10 %) vaikutukset eivät ole merkityksellisiä. Karkeaa lasimursketta käytettäessä tulokset olivat parempia kuin hienoa lasimursketta sisältävässä betonissa. Tutkimuksen mukaan betonin luonnonkiviaineksen korvaaminen lasimurskeella on kuitenkin mahdollista, kunhan otetaan huomioon se, että betonin ominaisuudet saattavat hieman heikentyä. Mikäli betonin valmistuksessa halutaan hyödyntää hienoa lasimursketta, on suositeltavaa käyttää nesteytintä, jotta säilytetään massan työstettävyyttä heikentämättä betonin mekaanisia ominaisuuksia kasvattamalla vesi-sideainesuhdetta. (Serpa ym. 2015.)

Betonisen purkujätteen kierrätyksen kehittäminen on tärkeää, koska sitä hyödynnettäessä uusiobetonin valmistuksessa voidaan purkujätteellä korvata luonnonkiviainesta. Purkubetonista saadun karkean uusiokiviaineksen käytöllä betonin valmistuksessa on positiivisia vaikutuksia, kuten ympäristön saastumisen vähentäminen, kaatopaikkajätteen määrän vähentäminen sekä luonnonkiviainesvarojen säästyminen. Purkujätteen kierrätyksellä ja uudelleenkäytöllä pystynee myös vähentämään kuljetuskustannuksia ja energiankulutusta. Betonisen purkujätteen hyödyntäminen uusiokiviaineksena betonissa on tavanomaista monissa Euroopan maissa, kuten Alankomaissa ja Belgiassa, jotka ovat muutenkin edistyskellisiä materiaalien kierrätyksessä. (Tabsh & Abdelfatah 2009.)

Luonnonkiviainekselle on asetettu erillinen vero joissakin Euroopan maissa, kuten Ruotsissa, Tanskassa ja Englannissa. Verotuksen toteutuksessa on hieman eroavaisuuksia eri maissa, mutta veron tarkoituksena on kannustaa vaihtoehtoisten ja kierrätettyjen materiaalien käyttöön. Ruotsissa on vuonna 1996 asetettu vero luonnonsoralle, koska verotuksen avulla pyrittiin suojelemaan maan soravaroja. Verotus ei koske kuitenkaan kallion murskaamisesta saatavaa kiviainesta. Luonnonsoran verotus on vaikuttanut siten, että kierrätettyjen materiaalien ja kalliomurskeen käyttö on lisääntynyt sekä luonnonsoran tuonti ulkomailta on kasvanut. Tanskassa kiviaineksen verotus koskee Tanskassa käytettäviä tai maahantuotuja raaka-aineita, joihin luetaan luonnonsoran lisäksi myös muut luonnon raaka-aineet (hiekkä, kivi, savi ym.). Samaan aikaan kiviainesveron

kanssa Tanskassa on muutettu jäteveroa. Näillä verouudistuksilla on haluttu rohkaista kierrätettyjen materiaalien hyödyntämiseen. Tavoite on onnistunut, sillä rakennus- ja purkujätteen kierrätysprosentti on vuonna 1985 ollut 12 % ja vastaavasti vuonna 2004 noussut 94 %:iin. Englannissa vuonna 2002 asetettu kiviainesvero koski luonnonkiviaineita, kuten hiekka, sora ja kalliomurske käytettäessä rakentamisen tarkoituksiin. Englannissakin kierrätettyjen materiaalien käyttö on yleistynyt huomattavasti. Englannissa uusiokiviaineksen osuus käytettävästä kiviaineksesta on suuri verrattuna muihin Euroopan valtioihin. (Söderholm 2011.)

Betonisen purkujätteen lisäksi kierrätettävää betonimursketta saadaan ylijäämänä valmisbetonin tai betonituotteiden (kuten elementtien) tuotannosta. Ylijäämäbetonin hyödyntäminen uusiokiviaineksena on kannattavaa, koska sitä syntyy väistämättä tuotantoprosessien sivutuotteena. Verrattuna purkubetoniin, tuotannon ylijäämäbetoni on puhtaampaa, ja sen laatu ja ominaisuudet ovat tiedossa tarkemmin, jolloin kontaminaatio-riski on alhaisempi. Ylijäämäbetonista valmistetun murskeen hyödyntäminen betonin valmistuksessa johtaa vastaaviin muutoksiin betonin ominaisuuksissa kuin purkubetonista valmistetun murskeen käyttö. Tutkimuksen mukaan 10 % luonnonkiviainesmäärän korvaaminen ylijäämäbetonista valmistetulla murskeella on suotavaa useisiin käyttötarkoituksiin soveltuvissa betoneissa. Ylijäämäbetonin hyödyntäminen uusiokiviaineksena ei edesauta pelkästään kiviaineksen ja sementin, vaan myös mahdollisesti betonissa käytettyjen muiden osa-aineiden kuten lentotuhkan ja masuunikuonan kierrätettävyyttä. (Obla ym. 2007.)

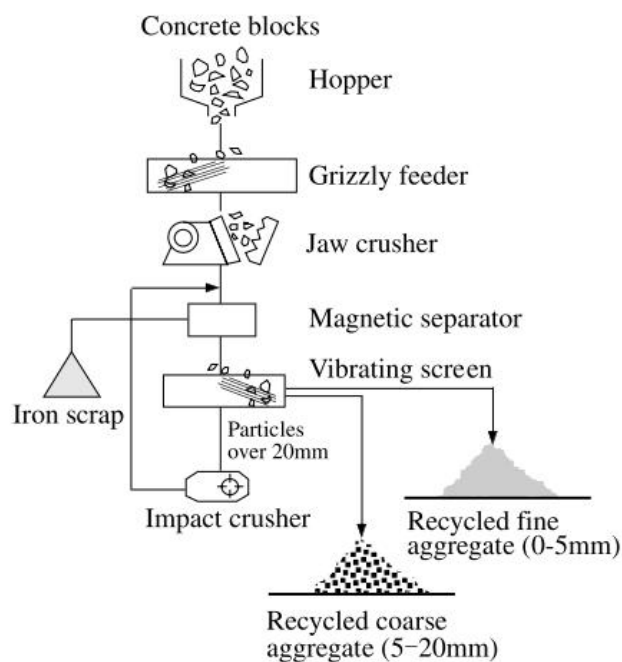
3 Murskattu betoni uusiokiviaineksena

3.1 Uusiokiviaineksen valmistus ja ominaisuudet

3.1.1 Valmistus

Purkubetonista valmistetaan uusiokiviainesta murskaamalla betoniset rakenneosat mekaanisesti pienemmiksi kappaleiksi. On tärkeää, että ennen murskausta betonijäte on lajiteltu siten, että muut purettavat rakenteet ja materiaalit on kierrätetty erikseen, eikä täten haitallista kontaminaatiota (kierrätettävien materiaalien tai epäpuhtauksien sekoitumista) pääse tapahtumaan (Newman & Choo 2003).

Murskaus voidaan suorittaa suoraan työmaalla siirrettävillä laitteistoilla tai betonijäte voidaan kuljettaa murskattavaksi erillisiin murskauslaitoksiin. Jäte voidaan työmaalla hajottaa pienemmiksi kappaleiksi, jotta jäte saadaan kuljetettua edelleen murskattavaksi. Magneettien avulla murskeesta erotellaan magneettiset metallit. Kuvat 3 ja 4 ovat valokuvia murskausprosessista työmaalta. Sopivan kappaleenkoon betonikappaleet murskaataan edelleen pienikokoisiksi kappaleiksi murskaimien avulla. Murskauksen jälkeen seulontalaitteistolla uusiokiviaines jaotellaan eri raekokoihin. Kuvassa 2 on esitetty uusiokiviaineksen valmistuksen prosessikaavio. (Pajukallio ym. 2011.)



Kuva 2. Uusiokiviaineksen valmistuksen prosessikaavio (Eguchi ym. 2007).



Kuva 3. Murskauksen yhteydessä betonijätteen joukosta on eroteltu magneettierottimen avulla materiaalit, jotka sisältävät rautaa.



Kuva 4. Valmista raekooltaan noin 150 mm:n betonimursketta purkutyömaalla.

Murskausmenetelmän vaikutus

Tutkimuksissa on havaittu uusiokiviaineen laatuun vaikuttavan merkittävästi sekä raaka-aineen eli lähtöbetonin laatu että kiviaineen valmistusprosessi. Yleisesti on käytetty uusiokiviaineen valmistukseen yksivaiheista murskausmenetelmää, mutta pro-

sessia on kehitetty, kun on huomattu silla olevan vaikutusta uusiokiviaineksen ominaisuuksiin. Yleisimmin murskaus tehdään yksi- tai kaksivaiheisena, mutta murskauslaitoksissa murskaus voidaan suorittaa kolmessa tai jopa neljässä vaiheessa. Murskaus toteutetaan yleensä vähintään kahdessa vaiheessa silloin, kun mursketta käytetään betonin valmistuksessa, ja sen maksimirakekoko on 32 mm. (Nagataki ym. 2004, Pajukallio ym. 2011, Newman & Choo 2003.)

Kuvissa 5 ja 6 on esitetty valokuvina betonijätteen murskaukseen käytettäviä murskaimia.



Kuva 5. Kaivinkoneen kauhassa oleva Kuva 6. Leukamurskain purkutyömaalla. murskain.

Tutkimuksessa on kokeiltu murskausprosessin kehittämistä ja lähtöbetonin laadun vaikutusta uusiobetonin ominaisuuksiin. Murskauksen ensimmäisessä vaiheessa lähtöbetoni murskataan iskumurskaimella ja leukamurskaimella. Toisessa vaiheessa murske ajetaan kahdesti mekaanisen jauhimen läpi, tavoitteena vähentää sementtipastan osuutta uusiokiviainespartikkelissa. Tutkimuksessa havaittiin, että monivaiheisen murskauksen avulla uusiokiviaineksen ominaisuuksia pystyttiin parantamaan, koska uusiokiviainesrakeessa oleva sementtipastan osuus on pienempi. Karkeat luonnonkiviainekset ja uusiokiviainekset ajettiin samojen murskausvaiheiden läpi. Ensimmäinen menetelmä oli yksivaiheinen murskaus iskumurskaimella. Toinen tutkimuksen menetelmä oli kaksivaiheinen, jossa ensimmäisen vaiheen iskumurskaimen (*impact crusher*) lisäksi murskausta jatkettiin vasaramurskaimella (*hammer mill*). Tämän jälkeen kiviainekset jaoteltiin raekokoihin mekaanisesti seulomalla. Tutkimuksen tuloksissa ei havaittu toisen murskausvaiheen lisäämisellä olevan selvää vaikutusta uusiokiviainesrakeiden tihey-

teen. Kuitenkin vaikutus rakeiden vedenimukykyyn oli huomattava, koska kaikilla kaksivaiheisesti murskatuilla materiaaleilla vedenimukyky oli systemaattisesti alhaisempi. (Pedro ym. 2014.)

3.1.2 Ominaisuudet

Yleistä

Uusiokiviainesrae on pieni pala murskattua betonia koostuen alkuperäisestä kiviaineksesta ja sementtipastasta (Nagataki ym. 2004). Uusiokiviaines voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin. Toinen tyyppi on kierrätetystä ylijäämäbetonista tai testiolosuhteissa valmistettu uusiokiviaines, jonka koostumus on hyvin tunnettu. Toinen tyyppi on purkujätteestä valmistettu uusiokiviaines, joka todennäköisesti sisältää epäpuhtauksia, kuten tiiltä, puuta ja muovia. Muiden materiaalien tai epäpuhtauksien osuus uusiokiviaineksessa riippuu paljon purkujätteen lähteestä. Uusiokiviaineksen raekoolla on myös merkitystä, sillä tutkimuksessa on havaittu, että karkeassa uusiokiviaineksessa epäpuhtauksien suhteellinen määrä on alhaisempi. (De Brito & Saikia 2013, s. 82–85.)

Uusiokiviaineksen sisältämän sementtipastan määrä riippuu kiviaineksen valmistusprosessista, koska murskausvaiheiden lisääminen vähentää sementtipastan osuutta. Toisaalta murskausvaiheiden lisääminen aiheuttaa kustannusten nousua. Täten on löydettävä ratkaisu, jossa on optimoitu uusiokiviaineksen laatu suhteessa sen valmistuskustannuksiin. Tutkimuksessa on osoitettu myös, että sementtipastan osuus uusiokiviaineksessa on pienempi alhaisen lujuuden betonista valmistetussa murskeessa. Uusiokiviainesjake 10/25 mm sisälsi sementtipastaa noin 20 %, kun taas jakeella 4/10 mm määrä oli noin 40 %. Näin ollen sementtipastan osuus uusiokiviaineksessa on selvästi alhaisempi karkeammilla uusiokiviainesjakeilla. (De Brito & Saikia 2013, s. 85–87, Etxeberria ym. 2007.)

Uusiokiviaines eroaa luonnonkiviaineksesta siksi, että se koostuu kivirakeen lisäksi sementtipastasta. Näin ollen uusiokiviaineksen ominaisuuksiin vaikuttaa oleellisesti sementtipastan laatu ja määrä. Uusiokiviaineksen sisältämä sementtipasta alentaa kiviaineksen tiheyttä, koska sementtipasta on kiveä kevyempää. Uusiokiviaineksen vedenimukyky on sitä suurempi mitä enemmän uusiokiviainesrakeessa on sementtipastaa, koska se on kiveä huokoisempaa. Uusiokiviaineksen muoto ja rakenne ovat erilaisia

kuin luonnonkiviaineksessa, mutta siihen voidaan vaikuttaa murskausmenetelmän valinnalla. Uusiokiviaineksen ominaisuudet on tunnettava, jotta voidaan ennakoida sen vaikutuksia uusiobetonin ominaisuuksiin. (Etxeberria ym. 2007.)

Sementtipastan osuutta uusiokiviaineksessa voidaan määrittää usealla eri menetelmällä. Eräässä menetelmässä määritykseen käytetään laimennettua suolahappoa, joka liuottaa sementtipastan vaikuttamatta lainkaan kiviainekseen. Menetelmän käyttöön liittyy rajoituksia, sillä esimerkiksi kalkkikivi ja kalkkikiveä sisältävät muut kivilajit myös liukenevat suolahappoon. Toisessa menetelmässä uusiobetonin valmistuksessa käytetään värjättyä sementtiä, jonka avulla voidaan näytteestä erotella uusi värillinen sementtipasta alkuperäisestä uusiokiviaineksestä. Kolmannessa menetelmässä uusiokiviaineksille tehdään vesiupotus ja kuumennus, joiden avulla pyritään poistamaan sementtipasta luonnonkiven pinnalta uusiokiviaineksessa. Näiden kolmen eri menetelmän vertailussa havaittiin, että lämpökäsittely antaa alhaisimman arvon sementtipastan määrälle, kun taas happokäsittelyssä määrä on suurin. (De Brito & Saikia 2013 s. 85–87.)

Uusiokiviaineksella on korkeampi vedenimukyky kuin luonnonkiviaineksella, jolloin myös sillä on suurempi huokoisuus. Korkealujuusbetonista valmistetun uusiokiviaineksen huokoisuus on kuitenkin selvästi alempi kuin alhaisemman lujuuden betonista valmistetun. Ero selittyy lähtöbetonien erilaisilla huokoskokojakaumilla, koska korkealujuusbetonilla huokokset ovat kooltaan pääosin alle 0,1 mm, kun taas normaalin betonin huokoisuus on pääosin välillä 0,01–1 mm. Lisäksi korkealujuusbetonien vesisementtisuhde on yleensä pienempi, jolloin myös niiden kapillaarihuokoisuuden määrä on pienempi. (De Brito & Saikia 2013 s. 99, Pyy 2015.)

Uusiokiviaineksella on usein karkeampi rakenne ja sen raemuoto on kulmikkaampi kuin luonnonkiviaineksella, mitkä saattavat aiheuttaa betonimassan työstettävyyden heikkenemistä. Uusiokiviaines on epähomogeenisempi ja huokoisempi sekä harvempi ja heikompi kuin luonnonkiviaines. Uusiokiviainesrakeet ovat kulmikkaampia ja niiden muotokerroin on noin 34 % suurempi kuin luonnonkiviaineksella. Muodon on havaittu vaikuttavan uusiokiviaineksen käyttöön betonin valmistuksessa. (Ferreira ym. 2011, De Brito & Saikia 2013, s. 102.)

Tiheys

Tiheys on kiviaineksen perusparametri, joka tulee tuntea betonin koostumusta suunniteltaessa sekä betonin ominaisuuksia arvioitaessa. Uusiokiviaineksen tiheyttä on määritetty useissa eri tutkimuksissa. Uusiokiviaineksen tiheys on alhaisempi kuin luonnonkiviaineksen. Alhaisempi tiheys johtuu uusiokiviaineksen sisältämästä sementtipastasta, koska se on huokoisempaa ja kevyempää kuin kivirae. Uusiokiviaineksen tiheys riippuu sementtipastan määrästä siten että uusiokiviaineksen tiheys on sitä suurempi mitä vähemmän sementtipastaa se sisältää. Uusiokiviaineksen tiheyteen vaikuttaa myös murskattavan betonin lujuus ja maksimiraekoko. Uusiokiviaineksen tiheys kasvaa maksimiraekoon kasvaessa. (De Brito & Saikia 2013, s. 87–92.)

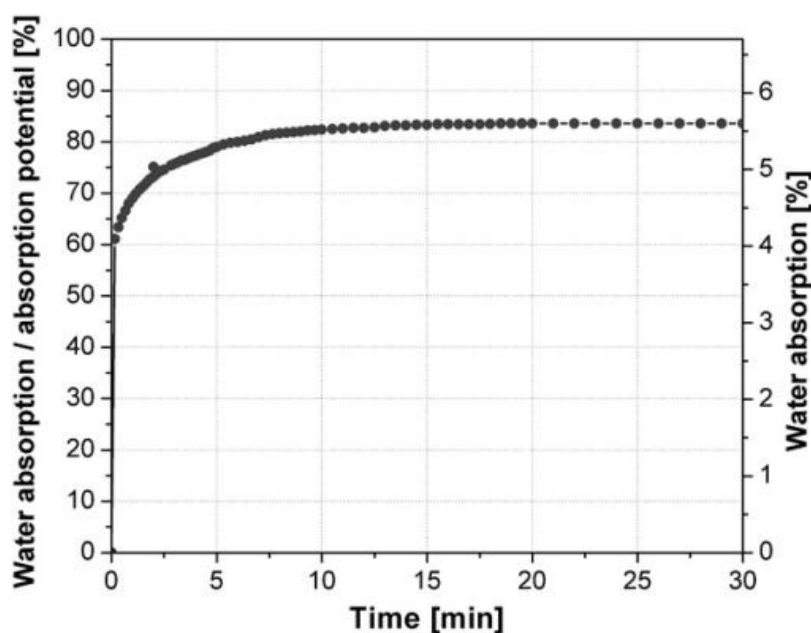
Vedenimukyky

Kappaleen vedenimukyvyllä tarkoitetaan siihen tietyn ajan kuluessa imeytynyttä suhteellista vesimäärää. Uusiokiviaineksen vedenimukyky on korkeampi kuin normaalilla kiviaineksella (de Oliveira & Vazquez 1996, Ferreira ym. 2011). Suomessa normaalin rapautumattoman luonnonkiviaineksen vedenimukyky on noin 0,3–0,5 % (BY 43 2008).

Uusiokiviaineksen vedenimukyky on pienempi, jos se on valmistettu betonista, jossa on alhainen vesi-sideainesuhde ja siten alhaisempi huokoisuus ja korkeampi lujuus. Uusiokiviainesrakeen koko vaikuttaa myös vedenimukykyyn. Hienommalla uusiokiviaineksella on korkeampi vedenimukyky kuin karkealla uusiokiviaineksella, koska siinä on myös suhteellisesti enemmän sementtipastaa sitoutuneena rakeeseen. Muiden ominaisuuksien vaikutusta vedenimukykyyn on tutkittu ja yhteys on havaittu muun muassa sementtipastan määrään ja kiintotiheyteen. (De Brito & Saikia 2013, s. 92–98.)

Tutkimuksessa on tarkasteltu myös uusiokiviaineksen vedenimeytymisen muutosta ajan funktiona, mikä on esitetty kuvassa 7. Kyseisessä tutkimuksessa vedenimukyvyn määrittäminen tehtiin standardin mukaisesti puhtaasta betonimurskeesta valmistetulle uusiokiviainekselle sekä kalliomurskeelle. Tuloksena saatiin, että uusiokiviaineksen vedenimukyky on kalliomurskeeseen verrattuna kuusinkertainen. Tutkimuksessa uusiokiviaines laitettiin vesiupotukseen, jotta voitiin tarkastella ajan kuluessa muutosta vedenimeytymisessä sekä vedenimeytymisessä suhteessa vedenimukykyyn. Uusiokiviaineksesta

havaittiin, että siihen oli imeytynyt vettä noin 80 % koko vedenimemiskapasiteetista viiden minuutin aikana. Tämän jälkeen veden imeytymisen kasvu on paljon hitaampaa. Tämän tutkimuksen tietoa on käytetty hyväksi ennakoitaessa uusiokiviaineksen käyttäytymistä betonin valmistuksessa. (Vieira ym. 2011.)



Kuva 7. Uusiokiviaineksen veden imeytyminen vesiupotuksessa ajan funktiona (Vieira ym. 2011).

Uusiokiviaineksen nopea ja suuri vedenimukyky verrattuna luonnonkiviainekseen vaikuttaa massan työstettävyyteen ja betonin vesi-sideainesuhteeseen. On kehitetty menetelmiä, joiden avulla pyritään kontrolloimaan betonin valmistusta siten, että uusiokiviaineksen käyttö ei vaikuttaisi negatiivisesti uusiobetonin ominaisuuksiin. Uusiokiviaineksen vedenimukyky riippuu sen kiviaineksen vedenimukyvystä ja sementtipastan vedenimukyvystä. Tutkimuksessa on havaittu, että uusiokiviaineksen vedenimukyky vaihtelee välillä 0,8–13 % ja keskiarvoksi on saatu 5,6 %. (Ferreira ym. 2011.)

On tutkittu myös uusiobetonin lujuuden ja pakkasenkestävyyden yhteyttä siihen, että valmistuksessa on käytetty erilaisissa kosteustiloissa olevia uusiokiviaineita. Tutkimuksessa todettiin, että vedellä kyllästetyille kiviaineksille tulokset sekä lujuuskokeissa että jäätymis-sulamiskokeissa olivat heikommat. Tutkimustulos osoittaa sen, että liiallinen kostutus vaikuttaa heikentävästi betonin ominaisuuksiin. (de Oliveira & Vazquez 1996.)

Uusiokiviaineksen vedenimukyvyn hallintamenetelmät

Uusiokiviaineksen vedenimukyvyn hallitsemiseksi on kehitetty useita menetelmiä, jotka yleisimmin tarkoittavat uusiokiviaineksen kostuttamista ennen betonin valmistusta. Uusiokiviaineksen kostutuksella voi olla myös haitallisia vaikutuksia. Mikäli uusiokiviainesta kostutetaan liikaa, sen pinnalle jää vapaata vettä, joka palautuu kiviaineksesta sementtipastaan ja vaikuttaa negatiivisesti betonin vesi-sideainesuhteeseen. (Ferreira ym. 2011.)

Uusiokiviaineksen vedenimukyvyn tasaamiseksi eräs menetelmä on betonimassan valmistuksessa lisättävän vesimäärän säätely. Vesimäärään lasketaan alkuperäisen laskennallisen määrän lisäksi uusiokiviaineksen vedenimuun tarvittava määrä. Uusiokiviaines kostutetaan siten betonin valmistuksen yhteydessä, jolloin uusiokiviainesta ei tarvitse erikseen valmistella tuotantoon, esimerkiksi kostuttamalla. Toinen tapa hallita uusiokiviaineksen vedenimukykyä on esikostutusmenetelmät, joista on olemassa paljon tutkimustietoa ja erilaisia variaatioita. (Ferreira ym. 2011.)

Uusiokiviaineksen korkean vedenimukyvyn vuoksi on tutkittu paljon uusiokiviaineksen kosteustilan vaikutusta tuoreen betonin ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Uusiokiviaineksen esikostutusta ja kyllästystä on käytetty joissain tutkimuksissa tavoitteena estää massan työstettävyyden heikkenemistä. (Poon ym. 2004.)

Uusiokiviaineksen kosteustilan hallintaan käytettävien menetelmien vaikutuksia tuoreen massan ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin on tutkittu. Tutkimuksessa karkean kiviaineksen kosteustilaa on hallittu kolmella menetelmällä: ilmakeuivaus (*air-dried, AD*), uunikeuivaus (*oven-dried, OD*) ja kyllästetty pintakeuivaus (*saturated surface-dried, SSD*). Ilmakeuivaus vastaa kiviaineksen normaalia kosteustilaa. Uunikeuivauksessa kiviaines kuivatetaan 105°C:ssa uunissa 24 tuntia ja jäähdytetään huonelämpötilaan ennen sekoitusta. Kyllästetyssä menetelmässä kiviaines on upotettuna vedessä 24 tuntia ja ennen sekoitusta pintakosteus poistetaan kostealla rievulla. Tutkittaessa eri kosteustilan hallinnan menetelmien vaikutuksia on betonin koostumuksen laskemisessa sovitettava vesimäärä kiviaineksen kosteussisällön mukaisesti. Uunikeuivatuille kiviaineksille vesimäärä on suurin, kun taas kyllästetyille pintakeuiville kiviaineksille maltillisempi. (Poon ym. 2004.)

3.2 Kokeellinen tutkimus

3.2.1 Yleistä

Diplomityön ensimmäisen vaiheen kokeellisessa tutkimuksessa tavoitteena oli tutkia purkujätteen eli murskatun betonin ominaisuuksia. Kokeellisessa tutkimuksessa selvitettiin kahden olemassa olevan purettavan rakennuksen betonirakenteiden lujuuksia. Purkukohteissa eri rakennetyypeistä poratuille rakennekoekappaleille määritettiin puristuslujuudet, jotta voitiin verrata todellisia lujuuksia suunnittelulujuuksiin sekä arvioida purkubetonin lujuusluokkia.

Purkujätteestä, eli betonilohkareista valmistettiin mursketta eli uusiokiviainesta murskaamalla ja seulomalla. Betonisen purkujätteen lohkarille ja valmiille murskeelle tehtiin vedenimukyvyn sekä tiheyden määrittämiä eri raekokoihin jaettuina. Valmiille betonimurskeelle määritettiin myös tasapainokosteus, jolla kuvataan aineeseen tietyssä ympäröivän ilman kosteudessa ja lämpötilassa sitoutuvaa kosteutta. Uusiokiviainelajitteen tasapainokosteus on tärkeä tietää koemassojen koostumuksen suunnittelua varten. Tässä kokeellisessa osassa valmistettua mursketta käytettiin toisen vaiheen koemassojen uusiokiviaineksena ja saatuja murskeen ominaisuuksia koebetonien koostumuksen suunnittelussa.

Kokeet on suoritettu pääosin Aalto-yliopiston betonilaboratoriossa. Osa laboratoriokokeista on valmisteltu Vahanen Oy:n betonilaboratoriossa. Kaikki tässä työssä suoritettut laboratoriokokeet ovat standardisoituja, ja käytetyt työvälineet täyttävät kyseistä välinettä koskevat standardien edellyttämät vaatimukset.

3.2.2 Lujuuskokeet rakennekoekappaleista

3.2.2.1 Koejärjestelyt

Purkubetonin lujuusluokkien arvioimiseksi tehtiin puristuslujuuskokeita eri betonirakenteista kahdesta purettavasta rakennuksesta. Rakennekoekappaleiden puristuslujuuskokeet tehtiin standardien EN 12504-1 ja EN 12390-3 mukaisesti (SFS 2009f, SFS 2009d). Rakennekoekappaleet on merkitty tunnisteilla rakennukseen ja rakenneosaan perustuen.

Ensimmäinen tutkittava purettava rakennus (rakennus A) on Helsingissä sijaitseva Lauttasaaren liikekeskus, joka on rakennettu vuonna 1970. Rakennus on pilari-palkkirunkoinen, ja kantavat rakenteet ovat betonia. Rakennuksen ulkoseinät ovat betoni-sandwich-elementtejä, joiden ulkopinta on maalattu. Lauttasaaren liikekeskuksessa puristuslujuusmäärittämiä varten porattiin näytteitä kellarikerroksen paikallavaletusta betoniseinästä (tunnisteilla A-1-1, A-1-2, A-1-3 ja A-1-4), välipohjan betonilaatasta (tunnisteilla A-2-1, A-2-2 ja A-2-3) sekä julkisivuelementtien sisäkuoresta (tunnisteilla A-3-1, A-3-2 ja A-3-3).

Toinen tutkittava purettava rakennus (rakennus B) on Hollolassa sijaitseva koulurakennus Hollolan yläaste, joka on rakennettu vuonna 1977. Rakennus on pilari-palkkirunkoinen. Rakennuksen kantavat rakenteet ovat betonia. Rakennuksessa on maanvarainen betonilaatta alapohjana ja sen ulkoseinät ovat betoni-sandwich-elementtejä, joiden ulkopinta on tiilimuurattu. Hollolan yläasteelta puristuslujuusmäärittämiä varten porattiin näytteitä julkisivuelementtien sisäkuoresta, maanvaraisesta betonilaatasta, kantavasta betonipilarista sekä kantavasta betonipalkista.

Referenssirakennuksissa tutkittavista betonirakenteista otettiin näytelieriöt timanttiporalla. Rinnakkaisia puristuslujuusnäytteitä rakenneosaa kohden on 2–4 kappaletta. Rakennekoekappaleet säilytettiin koestukseen asti sisätiloissa, joissa on normaalit lämpö- ja kosteusolosuhteet.

Näytelieriöt työstettiin laboratoriossa ennen koestusta. Rakennekoekappaleet sahattiin oikean mittaisiksi siten, että kappaleiden pituuden ja halkaisijan suhde on standardin mukaisesti $1,0 \pm 0,05$. Rakennekoekappaleiden puristuspintojen tasausta tehtiin hiomalla. Rakennekoekappaleisiin merkittiin tunnisteet, ja niille tehtiin silmämääräinen arviointi ja mittaukset. Rakennekoekappaleiden tunnisteet ja mittaukset on esitetty taulukossa 1. (SFS 2009f, SFS 2009d.)

Taulukko 1. Rakennekoekappaleiden tunnistet ja kappaleille tehtyt mittaukset. Tunnisteen alussa oleva kirjain kertoo kummasta rakennuksesta näyte on porattu.

	<i>rakenne</i>	<i>pituus</i> [mm]	<i>halkaisija</i> [mm]	<i>massa</i> [g]
A-1-1	seinä	87,0	84,5	1116
A-1-2	seinä	85,5	84,5	1114
A-1-3	seinä	87,0	84,5	1126
A-1-4	seinä	83,8	84,5	1115
A-2-1	välipohja	87,0	84,5	1135
A-2-2	välipohja	85,9	84,5	1103
A-2-3	välipohja	86,5	84,5	1127
A-3-1	elementin sisäkuori	86,4	84,5	1134
A-3-2	elementin sisäkuori	86,3	84,5	1130
A-3-3	elementin sisäkuori	86,3	84,5	1137
B-1-1	elementin sisäkuori	50,0	50,0	231
B-1-2	elementin sisäkuori	50,5	50,0	236
B-1-3	elementin sisäkuori	51,5	50,0	235
B-1-4	elementin sisäkuori	51,5	50,0	240
B-2-1	alapohja	52,0	50,0	237
B-2-2	alapohja	53,0	50,0	248
B-2-3	alapohja	53,0	50,0	234
B-2-4	alapohja	51,5	50,0	233
B-3-1	pilari	52,0	50,0	237
B-3-2	pilari	53,0	50,0	248
B-3-3	pilari	53,0	50,0	234
B-3-4	pilari	51,5	50,0	233
B-4-1	palkki	52,0	50,0	237
B-4-2	palkki	53,0	50,0	248

Puristuslujuuden määrittämiseen käytettiin kahta eri laitteistoa kuitenkin niin, että kaikki isommat koekappaleet (A-tunnisteen näytteet) testattiin samalla laitteistolla ja vastaavasti pienemmät koekappaleet (B-tunnisteen näytteet) toisella laitteistolla. Pienemmän koekappaleierion puristuskoejärjestely on esitetty kuvassa 8. Molemmissa laitteistoissa koekappale asetettiin keskeisesti hydraulisen puristimen väliin. Kuormituskokeessa laitteisto kasvattaa kappaleen kuormitusta tasaisella kasvunopeudella, kunnes murtoraja

ylittyy. Laitteisto antoi kappaleelle suurimman saavutetun kuorman sekä kappaleen puristuslujuuden. (SFS 2009d.)



Kuva 8. Pienemmän koekappalelieriön puristuslujuuden määrittäminen on käynnissä.

3.2.2.2 Koetulokset

Rakennekoekappaleiden puristuslujuusmäärittämiä tehtiin yhteensä 24 kappaletta. Puristuslujuusmäärittämiä tehtiin kahden eri purettavan rakennuksen betonirakennosille, yhteensä seitsemälle eri rakennosalle.

Rakennekoekappaleista voitiin määrittää betonin tiheys, kun rakennekoekappaleiden mitat ja massa oli tiedossa. Rakennekoekappaleiden puristuslujuus saatiin laskettua alla olevan kaavan avulla, kun suurin murtokuorma sekä koekappaleen mitat olivat tiedossa.

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (1)$$

missä	f_c	puristuslujuus [MPa] [N/mm ²]
	F	suurin kuorma murtohetkellä [N]
	A_c	kuormituksen alaisen koekappaleen poikkileikkauspinta-ala [mm ²]

Rakennekoekappaleista määritetyt tiheys, suurin saavutettu kuorma ja puristuslujuus on esitetty taulukossa 2. Kaikki koekappaleet murtuivat standardin mukaisesti hyväksyttävällä tavalla.

Taulukko 2. Koekappaleille määritetyt tiheys, suurin saavutettu kuorma ja puristuslujuus.

	<i>tiheys</i> [kg/m ³]	<i>maksimi- kuorma</i> [kN]	<i>puristuslujuus</i> [MPa]
A-1-1	2290	241,0	43,0
A-1-2	2320	220,0	39,2
A-1-3	2310	252,0	45,0
A-1-4	2370	203,8	36,4
A-2-1	2330	198,4	35,4
A-2-2	2290	184,6	32,9
A-2-3	2320	174,7	31,2
A-3-1	2340	266,2	47,5
A-3-2	2340	224,8	40,1
A-3-3	2350	223,9	39,9
B-1-1	2360	71,3	36,3
B-1-2	2380	66,3	33,7
B-1-3	2320	46,0	23,4
B-1-4	2380	81,7	41,6
B-2-1	2320	98,9	50,4
B-2-2	2390	88,7	45,2
B-2-3	2250	71,1	36,2
B-2-4	2310	57,6	29,3
B-3-1	2380	42,3	21,6
B-3-2	2390	84,6	43,1
B-3-3	2440	93,0	47,4
B-3-4	2390	93,0	47,4
B-4-1	2450	70,8	36,0
B-4-2	2410	104,7	53,3

3.2.2.3 Koetulosten tarkastelu

Rakennekoekappaleiden lujuuksista laskettiin rakenneosittain keskiarvot niistä tuloksista, joista rinnakkaisia tuloksia oli neljä. Muista rakenneosista määritettiin puristuslujuuksien vaihteluväli. Puristuslujuusarvoja verrattiin rakenneosittain suunnittelulujuuteen, mikäli se oli tiedossa. Muilta osin tulosten perusteella arvioitiin purkubetonin lujuusluokkaa yleisesti.

Lauttasaaren liikekeskuksen (Rakennus A) kaikkien lujuustulosten (10 kappaletta) keskiarvo on 39,1 MPa. Puristuslujuuksien keskiarvot ja vaihteluvälit rakenneosittain on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Lauttasaaren liikekeskuksen (rakennus A) lujuustulosten keskiarvot ja vaihteluvälit rakenneosittain.

<i>rakenneosa</i>	<i>lujuuden keskiarvo [N/mm²]</i>	<i>lujuuden vaihteluväli [N/mm²]</i>	<i>rinnakkais- näytteiden lukumäärä</i>
kellarin paikallavalettu betoniseinä	40,9	36,4–45,0	4
välipohja	-	31,0–35,4	3
elementin sisäkuori	-	39,9–47,5	3

Purkukohteessa tehtyjen silmämääräisten havaintojen ja lujuusmääritysten perusteella betonisen purkujätteen laatu Lauttasaaren liikekeskuksessa on keskiluokkaa, jolloin sitä voitaisiin hyvinkin käyttää uusiobetonin valmistuksessa, jos uusiobetonin tavoitelujuus on korkeintaan luokkaa 30-35 MPa.

Hollolan yläasteen (Rakennus B) kaikkien lujuustulosten (14 kappaletta) keskiarvo on 38,9 MPa. Puristuslujuuksien keskiarvot ja vaihteluvälit sekä Hollolan yläasteen rakennetyyppiin perustuvien suunnittelulujuudet rakenneosittain on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Hollolan yläasteen (rakennus B) puristuslujuuksien keskiarvot ja alkuperäiset suunnittelulujuudet rakenneosittain.

<i>rakenneosa</i>	<i>lujuuden keskiarvo [N/mm²]</i>	<i>lujuuden vaihteluväli [N/mm²]</i>	<i>suunnittelu- lujuusluokka</i>	<i>rinnakkais- näytteiden lukumäärä</i>
elementin sisäkuori	33,8	23,4–41,6	BK300	4
alapohjan maan- varainen laatta	40,3	29,3–50,4	-	4
elementtipilari	39,9	21,6–47,4	AK400	4
elementtipalkki	-	36–53,3	AK500	2

Purettavassa rakennuksessa tehtyihin silmämääräisiin havaintoihin, alkuperäisiin suunnittelulujuusluokkiin sekä tehtyihin lujuusmäärittäisiin perustuen voidaan todeta että Hollolan yläasteessa betonisen purkujätteen laatu on keskiluokkaa. Tehdyistä lujuusmäärittäyksistä havaittiin, että rakennekoekappaleiden lujuuksien keskiarvot eivät ole yhdessäkään tutkitussa rakenteessa suunnittelulujuuksia alempia. Hollolan yläasteen betonirakenteet soveltuvat erityisen hyvin tavoitelujuudeltaan 30-35 MPa:n uusiobetonin valmistukseen. Hajonnat lujuusmäärittäyksissä osoittavat sen, että lujuuskokeita on tehtävä riittävän monta, jotta betoni voidaan luokitella luotettavasti.

3.2.3 Betonimurskeen ominaisuudet ja laatu

3.2.3.1 Koejärjestelyt

Uusiokiviaines valmistettiin murskaamalla betoninen purkujäte eli betonilohkareet tasalaatuisiksi murskeeksi, josta voitiin määrittää murskeen ominaisuudet (kuten vedenimukyky) ja verrata niitä luonnonkiviainekseen. Vedenimukyvyn määrittäykset tehtiin standardin SFS-EN 1097-6 mukaisesti eri raekokoihin jaettuina (SFS 2014).

Tässä työssä uusiokiviaineksen valmistusta varten saatiin kahdelta eri purkutyömaalta noin raekooltaan 100-150 mm:n kokoista betonista purkujätettä. Betonilohkareet valikoitiin sattumanvaraisesti työmaalta ulko-olosuhteista. Betonilohkareista ei tiedetä lähtötietoja, kuten mistä rakenteesta lohkarit ovat peräisin. Betonirakenteiden purkuajan kohta ei ole tiedossa, joten ei voida tietää, kuinka kauan betonilohkareet ovat työmaalla olleet.

Purkutyömaalta kerättiin vedenimukyvyyn määrittystä varten silmämääräisesti arvioituna ominaisuuksiltaan erilaisia betonilohkareita. Osa lohkarista otettiin kasan päältä, jolloin ne ovat auringon kuivattamia. Osa lohkarista kaivettiin syvemmältä siten, että niiden katsottiin olevan hieman kosteita. Osa betonilohkarista näytti selvästi tummemmalta ja tiiviimmältä betonilta kuin toiset. Silmämääräiset havainnot kirjattiin ennen vedenimukyvyyn määrittäystä. Vedenimukyvyyn määrittäykset tehtiin Vahanen Oy:n betonilaboratoriossa heti, kun näytteet oli kerätty purkutyömaalta.

Purkutyömailta kerättiin uusiokiviaineksen valmistusta varten runsaasti betonilohkareita, joita ei juurikaan valikoitu vaan ne valittiin sattumanvaraisesti. Osa lohkarista kerättiin laajemmalla alueella ja osa poimittiin kasasta. Betonilohkareet säilytettiin muovilaitteissa sisätiloissa ja toimitettiin Aalto-yliopiston tielaboratorioon, jossa lohkarit murskattiin eli betonijätteestä valmistettiin uusiokiviainesta.

Betonilohkareet murskattiin kuvan 9 leukamurskaimella, jossa leukojen välistä etäisyyttä pystyy säätämään. Uusiokiviaines valmistettiin siten, että murske-erä ajettiin vähintään kahteen kertaan murskaimen läpi, ja leukojen etäisyyttä säädettiin kierrosten välillä. Ensimmäinen murskaus tehtiin isommilla leuan säädöillä, jolloin leuat ovat kauempana toisistaan. Toista murskauskierrosta varten leukojen etäisyyttä pienennettiin, jotta maksimiraekoon eli 32 millimetrin koon ylittävän uusiokiviaineksen määrä murskeessa olisi minimoitu. Ensimmäinen murskauskierros tehtiin isommilla leukojen säädöillä, jotta hienointa pölyä tulisi vähemmän.



Kuva 9. Laboratorion leukamurskain, jolla valmistettiin uusiokiviainesta purkubetonista.

Murskauksen jälkeen uusiokiviaines seulottiin eri rakeisuuksiin. Murskeelle tehtiin kuivaseulonta vastaavasti kuin tavanomaiselle luonnonkiviainekselle. Seulonnassa murske kaadettiin seulasarjaan. Seulasarja koostuu seuloista, jotka on asetettu päällekkäin silmäkooltaan ylhäältä alaspäin pienenevään järjestykseen, sekä pohja-astiasta ja kannesta. Seulasarjaa ravistettiin koneellisesti, minkä jälkeen irrotettiin seulat yksitellen alkaen aukkokooltaan suurimmasta. Jokaista seulaa ravistettiin vielä hieman käsin ennen kuin seulalle jäänyt murske erotettiin. Uusiokiviainesmurske lajiteltiin rakeisuuden mukaisesti kolmeen eri lajitteeseen, jotka olivat # 16–32 mm, # 8–16 mm ja # 0,125–8 mm. Seulonnassa jäi yli hienoin pöly, jota ei käytetty uusiobetonin valmistuksessa lainkaan. Kuvassa 10 on valokuva valmiista seulotusta murskeesta.



Kuva 10. Valmista uusiokiviainesta (# 8–16 mm), joka on murskattu ja seulottu.

Betonilohkareille ja uusiokiviaineslajitteille tehtiin vedenimukyvyn määritykset. Vedenimukyvyn määrityksessä testinäytteet laitettiin vesiupotukseen 4 vuorokauden ajaksi, jolloin näytteet on kyllästetty vedellä. Tämän jälkeen testinäytteet poistettiin vedestä ja niiden pinnalta kuivattiin vesi kunnes näytteiden pinta on himmeä, mutta ei enää märkä ja kiiltävä. Testinäytteet punnittiin, jotta saatiin niiden märkäpaino. Tämän jälkeen testinäytteet kuivattiin lämpökaapissa 105 °C lämpötilassa vakiomassaan. Testinäytteet punnittiin, jotta saatiin niiden kuivapaino. (SFS 2014.)

Uusiokiviaineslajitteille tehtiin tasapainokosteuden määrittäminen samalla tavoin kuin vedenimukyvyn määrittäminen. Testinäytteet punnittiin kuitenkin myös ennen vesiupotusta, jotta saatiin vakioapaino, eli testinäytteiden massa niissä olosuhteissa, joissa uusiokiviaines on säilytettävänä. Vertailun vuoksi tasapainokosteuden määrittäminen tehtiin myös luonnonkiviaineslajitteista, joita tullaan korvaamaan uusiokiviaineksella kokeellisen osuuden toisessa vaiheessa.

Uusiokiviaineslajitteiden kuivatiheydet määritettiin kokeellisesti. Tiheysmäärittäminen tehtiin myös vertailun vuoksi luonnonkiviaineslajitteelle. Testinäytteet kuivattiin lämpökaapissa 105 °C lämpötilassa vakiomassaan. Tämän jälkeen testinäytteet kaadettiin mittalasiin, jossa oli valmiina tietty tilavuusmitta vettä (alkutilavuus). Testinäytteiden lisäyksen jälkeen katsottiin välittömästi tilavuusmitan uusi arvo (lopputilavuus). (SFS 2014)

3.2.3.2 Koetulokset

Purkutyömaalta kerätyille betonilohkareille laskettiin vedenimukyky alla olevan kaavan mukaisesti. Tulokset betonilohkareiden vedenimukyvyille on esitetty taulukossa 5.

$$W = \frac{M_1 - M_2}{M_2} * 100, \quad (2)$$

missä	W	vedenimukyky [%]
	M ₁	kyllästetyn ja pintakuivan testinäytteen massa [g]
	M ₂	uunikuivatun testinäytteen massa [g]

Taulukko 5. Purkubetonin vedenimukyky.

<i>tunniste</i>	<i>havainnot näytteestä</i>	<i>vedenimukyky [%]</i>
1	kuiva, vaalea	11,6
2	kuiva, tumma	2,8
3	kasakostea, vaalea	7,8
4	kasakostea, vaalea	5,1
5	kasakostea, tumma	8,5

Valmiin betonimurskeen lajitteiden ominaisuudet määritettiin laboratoriokokein. Murskeen vedenimukyky laskettiin edellä esitetyn kaavan mukaisesti. Tasapainokosteus saatiin alla olevan kaavan mukaisesti. Valmiin murskeen ominaisuudet on esitetty taulukossa 6.

$$u = \frac{M_0 - M_2}{M_2} * 100, \quad (3)$$

missä	u	tasapainokosteus (kosteuspitoisuus) [%]
	M ₂	uunikuivatun testinäytteen massa [g]
	M ₀	testinäytteen massa vakio-olosuhteissa [g]

Taulukko 6. Kiviainesten ominaisuudet

<i>lajite</i>	<i>laatu</i>	<i>tiheys [Mg/m³]</i>	<i>vedenimukyky [%]</i>	<i>kosteuspitoisuus [%]</i>
# 16–32	uusiokiviaines	2,45	6,0	0,93
# 8–16	uusiokiviaines	2,45	7,4	1,19
#0,125–8	uusiokiviaines	2,44	7,8	1,72
# 5–10	luonnonkiviaines	2,65	-	0,24
hieno	luonnonkiviaines	-	-	0,25

3.2.3.3 Koetulosten tarkastelu

Betonisen purkujätteen lohkareiden murskauksessa leukamurskaimen säädöt vaikuttivat syntyvän murskeen laatuun. Silmämääräisesti arvioituna parasta mursketta saatiin siten, että ensimmäisessä vaiheessa leukojen välinen etäisyys oli säädetty suuremmaksi kuin haluttu murskeen maksimiraekoko. Tässä vaiheessa syntyi paljon mursketta, joka oli vielä liian karkeaa valmiiksi murskeeksi, mutta toisaalta hienoainesta tuli prosessissa vähemmän. Toiselle murskauskierrokselle leukoja säädettiin lähemmäs toisiaan, mutta kuitenkin siten, että osa murskeesta oli edelleen liian karkeaa. Murskausta kokeiltiin myös kolmivaiheisena, mikä paransi raemuotoa hieman, mutta samalla kasvatti hienoimman lajitteen määrää.

Kaksivaiheisella murskauksella ja seulonnalla havaittiin, että kolmea lajitetta: # 16–32 mm, # 8–16 mm ja # 0–8 mm syntyi painoprosenttien suhteessa suunnilleen saman verran. Hienosta lajitteesta erotettiin lopuksi seulomalla hienoin pöly pois, siten että lopullinen hienoin uusiokiviaineslajite oli # 0,125–8 mm. Ylisuurta lajitetta (yli # 32 mm) jäi yli vain vähän.

Raemuodoltaan murske on selvästi kulmikkaampaa kuin luonnonkiviaines. Murske on myös heikompaa, sillä yksittäisten murskekappaleiden havaittiin murtuvan seulonnan aikana. Varsinkin karkeimman uusiokiviaineslajitteen raemuoto on kulmikkaampi tai pitkulaisempi kuin luonnonkiviaineksella. Kalliomursketta valmistettaessa saadaan vastaavia muotoja kiviainekselle kuin betonin murskauksessa. Näin ollen luonnonkiviainesta käytetään myös kulmikkaampina raemuotoina.

Uusiokiviaineksen tiheyden keskiarvoksi määritettiin 2,45 Mg/m³, kun vastaava tiheys luonnonkiviainekselle on 2,65 Mg/m³. Uusiokiviaineksen alhaisempi tiheys merkitsee

sitä, että se on luonnonkiviainesta kevyempää. Kiviaineksen tiheys tulee huomioida betonin koostumuksen suunnittelussa. Uusiokiviaineksen ja luonnonkiviaineksen tiheydet ovat kuitenkin sen verran lähellä toisiaan, joten ne käyttäytyvät samalla tavalla tuoreessa betonimassassa, esimerkiksi tiivistämisen aiheuttaman erottumisen suhteen.

Betonilohkareille määritetyt vedenimukyvyt vaihtelivat välillä 2,8–11,6 % ja niiden keskiarvoksi saatiin 7,2 %. Uusiokiviaineslajitteille lasketut vedenimukyvyn arvot vaihtelivat välillä 6,0–7,4 %. Kun murskattua betonia halutaan käyttää uusiobetonin valmistuksessa, tulee huomioida uusiokiviaineksen korkeampi vedenimukyky verrattuna luonnonkiviainekseen.

Valmiille murskeelle määritettiin kosteuspitoisuudet uusiokiviaineslajitteille. Kosteuspitoisuuksista havaittiin, että vastaavissa säilytysolosuhteissa olevan luonnonkiviaineksen kosteuspitoisuus oli noin 0,25 %, kun uusiokiviaineslajitteiden kosteuspitoisuus oli välillä 0,9–1,7 %. Uusiokiviaineksen kosteuspitoisuus oli alhaisin karkeimmassa lajitteessa, ja korkeampi hienommissa lajitteissa. Uusiokiviaineksen korkeampi kosteuspitoisuus vaikuttaa massan koostumuksen suunnitteluun, sillä kiviaineksessa on sitoutuneena enemmän vettä.

3.3 Uusiokiviaineksen ominaisuuksien optimointi betonituotannon tarpeisiin

3.3.1 Purkujäte raaka-aineena

Purkamisen yleistyessä betonijätteen määrä on kasvussa. Jotta betonijätteen hyötykäyttöä voidaan parantaa, tulee kehittää betoniselle purkujätteelle luokittelu. Luokkien mukaan jäte voidaan osoittaa uudelleen käytettäväksi sellaisessa tarkoituksessa, missä sen ominaisuudet tulee hyödynnettyä parhaiten. Suomessa betonista purkujätettä murskaataan ja toimitetaan hyötykäyttöön pääosin maarakennustarkoituksiin, kuten yleisten teiden ja katujen sekä pysäköintialueiden rakentamisessa. Kun hyvälaatuisen betonijätteen määrä on kasvussa, on syytä kehittää hyötykäyttöäkin, kuten uusiobetonin valmistusta. Näin saadaan parannettua kierrätysastetta, koska luonnonkiviainesvaroja säästyy ja betonijätteen mahdollisuudet tulee hyödynnettyä tehokkaimmin.

Purkujätteen laatuluokittelu alkaa purettavan rakennuksen tai rakenteen tutkimisesta. Alussa määritetään purettavat rakenteet ja tutustutaan alkuperäisiin suunnitelma-asiakirjoihin, mikäli mahdollista. Rakennuksen elinkaaren aikainen käyttötarkoitus tulee myös selvittää, jotta voidaan arvioida rakennuksen rakenteiden puhtautta ja mahdollisia riskejä esimerkiksi rakenteisiin imeytyneistä haitta-aineista. Betonijätteen uudelleenkäyttökelpoisuus täytyy tarvittaessa varmistaa analysoimalla betoninäytteistä mahdollisesti imeytyneet haitalliset aineet. Mikäli betonijätteen haitallisten aineiden pitoisuuden ja liukoisuuden Valtioneuvoston asetuksen 179/2012 vaarallisen jätteen raja-arvot alituvat, betonijäte voidaan kierrättää.

Purettavan rakennuksen alkuperäisistä suunnitelma-asiakirjoista pyritään arvioimaan betonin laatua. Usein rakennetyyppiirroksissa on maininta betonin tavoitelujuusluokasta. Tarvittaessa betonirakenteiden lujuutta arvioidaan tarkemmilla tutkimuksilla siten, että rakenteista porataan rakennekoekappaleita, joille tehdään puristuslujuuden määritykset ja silmämääräinen arviointi. Kun purkubetonin laatu on tiedossa, myös uusiokiviaineksen raaka-aineen ominaisuudet tunnetaan.

Uudelleenkäyttöön kelpaava purkubetoni luokitellaan kolmeen luokkaan:

- Luokka 1 – korkealujuuksinen betonijäte
- Luokka 2 – tavanomaisen lujuusluokan betonijäte
- Luokka 3 – alhaisen lujuusluokan betonijäte.

Ensimmäiseen luokkaan (Luokka 1) kuuluu betonijäte, jossa alkuperäinen rakennekoekappaleiden puristuslujuus on ollut yli 45 N/mm^2 tai suunnitelma-asiakirjojen perusteella voidaan luokitella purkubetoni luotettavasti tähän luokkaan. Toiseen luokkaan (Luokka 2) kuuluu betonijäte, jossa alkuperäinen rakennekoekappaleiden puristuslujuus on ollut välillä $30\text{--}45 \text{ N/mm}^2$ tai suunnitelma-asiakirjojen perusteella voidaan luokitella purkubetoni luotettavasti tähän luokkaan. Kolmanteen luokkaan (Luokka 3) kuuluu betonijäte, jossa alkuperäinen rakennekoekappaleiden puristuslujuus on ollut alle 30 N/mm^2 tai suunnitelma-asiakirjojen perusteella voidaan luokitella purkubetoni tähän luokkaan.

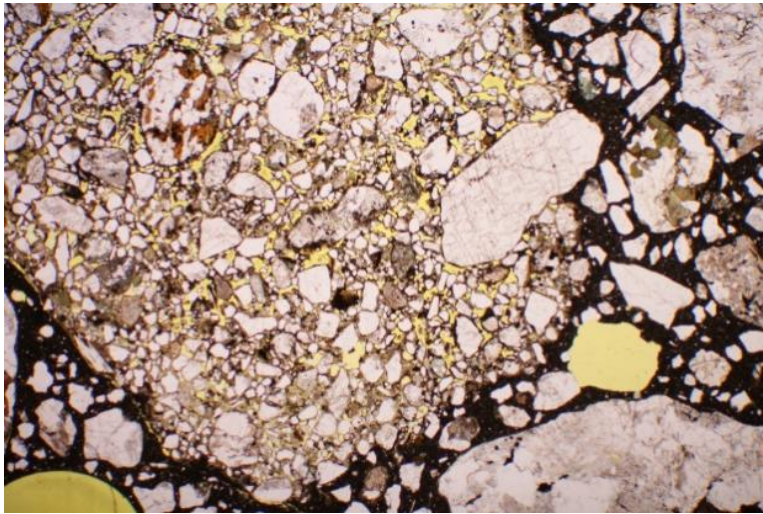
Betonijätteen luokittelun avulla voidaan vaikuttaa uusiobetonin ominaisuuksiin. Ajatuksena lujuusluokitukselle on se, että alhaisemman laadun (lujuus) raaka-aineesta ei voi

valmistaa korkeamman laatuista betonia. Näin ollen uusiobetonin valmistukseen voidaan valita uusiokiviaines tavoiteltavien ominaisuuksien mukaan. Luokkaan 1 (paras laatu) kuuluvia uusiokiviaineita voidaan käyttää uusiobetonissa, jonka tavoitelujuus on korkeintaan 45 N/mm^2 . Luokkaan 2 (keskilaatu) kuuluvia uusiokiviaineita voidaan käyttää C-luokan uusiobetonissa, jonka tavoitelujuus on korkeintaan 30 N/mm^2 . Luokkaan 3 (alhaisin laatu) kuuluvia uusiokiviaineita voidaan käyttää uusiobetonissa, jolle ei ole asetettu rakenteellisia laatuvaatimuksia.

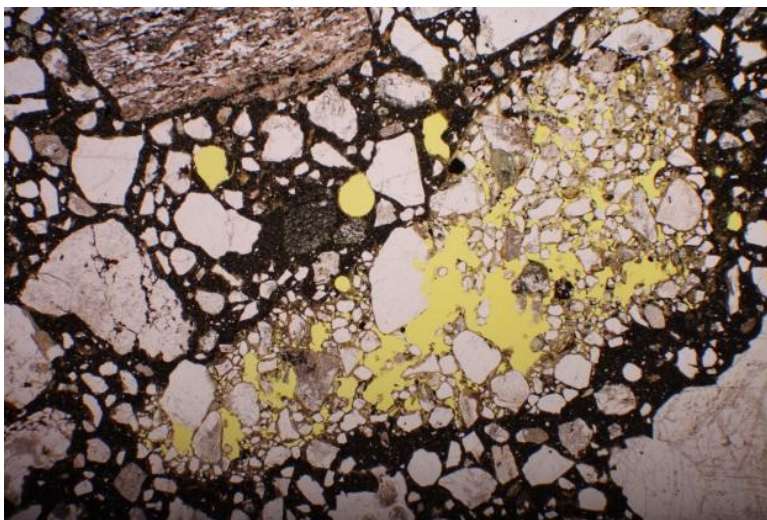
Vastaavaa luokitusta voidaan soveltaa valmisbetoniasemilta ja elementtitehtailta ylijääneen betonin hyödyntämiseen uusiobetonissa. Ylijäämäbetonin suunnitteluominaisuudet ovat vielä tarkemmin hallinnassa, joten ylijäämäbetoni voidaan lajitella eri luokkiin erittäin luotettavasti.

3.3.2 Uusiokiviaineksen valmistus

Uusiokiviaines valmistetaan murskaamalla betonijäte. Uusiokiviaineksen valmistuksessa tulee huomioida aiempi purkujätteen luokittelu lujuuden perusteella. Murskaus suoritetaan erissä siten, että eri lujuusluokan purkujätteet eivät sekoitu keskenään. Mitä huolellisemmin luokittelu ja lajittelu tehdään, sitä paremmin uusiokiviaineksen ominaisuudet tunnetaan. Uusiokiviaineksen laatu on tärkeä tuntea, jotta voidaan valmistaa mahdollisimman laadukasta uusiobetonia. Heikon lujuuden omaava uusiokiviainesrae aiheuttaa, erityisesti kooltaan suurina rakeina esiintyessään, betoniin paikallisesti alhaisen lujuuden. Heikkolaatuisen uusiokiviainesrakeen vaikutukset betonissa on verrattavissa puutteellisen tiivistymisen aiheuttamaan valuharventumaan. Kuvat 11 ja 12 ovat esimerkkinä mikroskooppisesta tarkastelusta, jossa on havaittu harva ja heikkolaatuinen uusiokiviainesrae uusiobetonissa.



Kuva 11. Harva eli laadultaan heikko uusiokiviainesrae betonissa tämän diplomityön koebetonissa 3. Harvarakenteinen rae näkyy kuvassa vaaleana alueena. Kuvan lyhyt sivu vastaa näytteessä 7 mm. (Pyy 2015.)



Kuva 12. Erittäin harva eli heikkolaatuinen uusiokiviainesrae betonissa tämän diplomityön koebetonissa 5. Erittäin harvarakenteinen rae näkyy kuvassa vaaleana ja keltaisena alueena. Kuvan lyhyt sivu vastaa näytteessä 7 mm. (Pyy 2015.)

Betoninen purkujäte murskataan purkutyömaalla tai erillisessä murskauslaitoksessa vähintään kaksivaiheisesti. Kaksivaiheisella murskauksella saadaan paremman laatuista uusiokiviainesta kuin yhdessä vaiheessa toteutetulla murskauksella. Murskausmenetelmä tulee valita siten, että uusiokiviaineen laatu ja ominaisuudet ovat mahdollisimman hyviä.

Uusiokiviaineksen tuotantokustannuksiin ja ekologisuuteen vaikuttaa merkittävästi, voidaanko valmistus, eli lajittelu, murskaus ja seulonta, suorittaa purkutyömaalla tai sen välittömässä läheisyydessä. Painavan betonisen purkujätteen sekä valmiin murskeen kuljettaminen pitkiä matkoja nostaa valmistuskustannuksia ja ympäristövaikutuksia.

Uusiokiviaineksen valmistuksessa murskauksen yhteydessä betonijätteestä erotellaan raudat sekä mahdolliset epäpuhtaudet ja toimitetaan kierrätettäväksi tai muuhun asianmukaiseen käsittelyyn. Murskauksen jälkeen uusiokiviaines seulotaan fraktioihin: # 16–32 mm, # 8–16 mm ja # 0–8 mm.

Suomessa valmistetaan betonisesta purkujätteestä mursketta maanrakentamistarkoitukseen. Useilla valmistajilla murske on CE-merkitty standardin SFS-EN 13242 (Maa- ja vesirakentamisessa käytettävät sitoutumattomat ja sidotut kiviainekset) mukaisesti. Vastaavalla menetelmällä valmistettua mursketta voidaan varmasti suhteellisen helposti ja luotettavasti alkaa hyödyntää myös uusiobetonin valmistuksessa. Tämän kehityksen avulla saataisiin hyvälaatuinen betonijäte takaisin kiertoon, kun siitä voidaan valmistaa uusiobetonia.

4 Uusiobetoni

4.1 Uusiobetonin valmistus ja ominaisuudet

4.1.1 Uusiobetonin koostumus ja valmistus

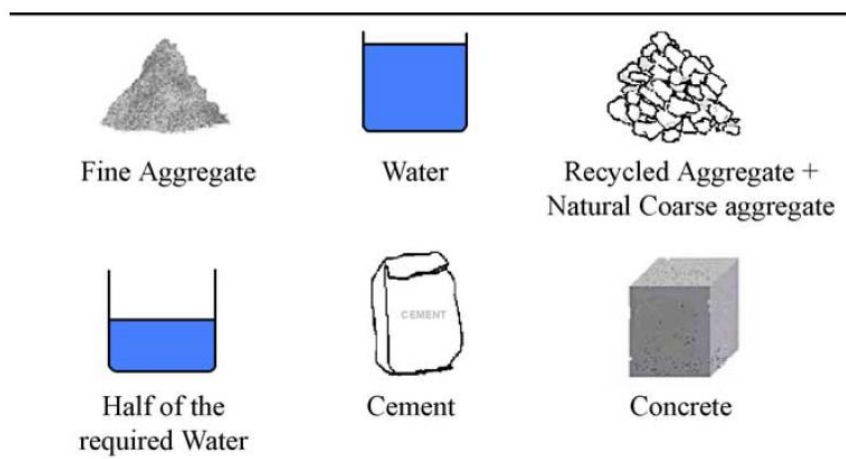
Uusiobetonin valmistuksessa käytetään uusiokiviaineksen lisäksi luonnonkiviainesta, sementtiä ja vettä sekä tarpeen mukaan lisäaineita, kuten notkistinta. Useissa tutkimuksissa uusiobetonissa käytetään vain karkeaa uusiokiviainesta, koska sen ominaisuudet kuten vedenimukyky ovat paremmin uusiobetoniin soveltuvia. Uusiokiviaineella korvataan luonnonkiviainesta tietyillä prosenteilla. Toisinaan tutkimuksissa on korvattu luonnonkiviainesta jopa 100 % uusiokiviaineksella. Sementin määrä on useissa tutkimuksissa pidetty vakiona, jotta nähdään uusiokiviaineksen todellinen vaikutus betonin ominaisuuksiin, esimerkiksi lujuuteen. (De Brito & Saikia 2013, Etxeberria ym. 2007.)

Uusiobetonin valmistuksessa uusiokiviainesta voidaan käyttää betonimassaan kostutettuna. Uusiokiviaineksen esikostutus ennen valmistusta estää kiviainesta imemästä betonimassaan sekoitettua vettä, joka on tarkoitettu reagoimaan sementin kanssa muodostaa sementtipastan. Lisäksi massasta uusiokiviainekseen imeytyvä vesi jäykistää massaa. Uusiokiviaineksen täydellinen kyllästäminen vedellä saattaa aiheuttaa sen että vettä uusiokiviaineksen pinnalla on liikaa, jolloin sitä vapautuu sementtipastaan. (De Brito & Saikia 2013 s. 92–99.)

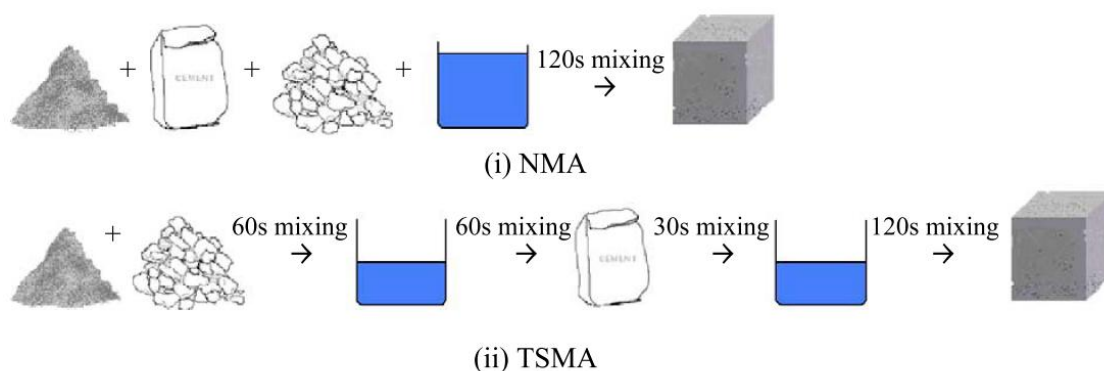
Toinen vaihtoehto ottaa huomioon uusiokiviaineksen korkeampi vedenimukyky on betonimassan sekoitusmenetelmien kehittäminen. Sekoitusmenetelmien kehittämisellä saadaan ratkaisuja, joita voidaan käyttää betonituotannossa, koska uusiobetonia voidaan valmistaa samalla tavoin kuin tavanomaista betonia. Normaalia sekoitusmenetelmää (*NMA – Normal mixing approach*) käytettäessä betoni valmistetaan siten, että kiviainekset ja sementit punnitaan sekoittimeen, ja sekoituksen alussa kaikki vesi lisätään sekoittimeen. Sekoitusmenetelmää on kehitetty kaksivaiheiseksi (*TSMA – Two-stage mixing approach*), jossa vettä lisätään massaan kahdessa vaiheessa. (De Brito & Saikia 2013 s. 92–99, Tam & Tam 2007.)

Kaksivaiheista sekoitusmenetelmää käytettäessä betonimassa valmistetaan siten, että sekoittimeen punnitaan ensin sekä luonnonkiviainekset että uusiokiviainekset. Tämän

jälkeen aloitetaan ensimmäinen sekoitusvaihe, jossa massaan lisätään puolet siihen suunnitellusta vesimäärästä. Sitten sekoittimeen lisätään sementti ja loppu vesi, minkä jälkeen massan sekoitusta jatketaan. Normaalin sekoitusmenetelmän ja kaksivaiheisen sekoitusmenetelmän vaiheet on esitetty kuvassa 14 ja kyseisessä kuvassa käytetyt symbolit kuvassa 13. (Tam ym. 2007 & Tam ym. 2005.)



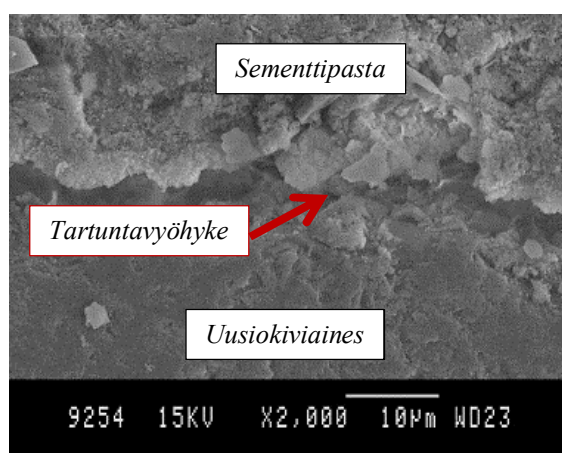
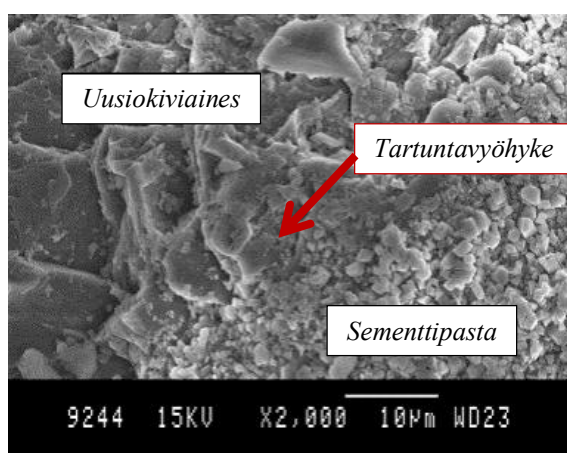
Kuva 13. Symbolit, joilla kuvataan eri osa-aineet sekoitusmenetelmien kuvauksissa, lueteltuna ylhäältä vasemmalta alkaen: hieno kiviaines, vesi, uusiokiviaines + karkea kiviaines, puolet vaadittavasta vedestä, sementti ja betoni (Tam ym. 2005).



Kuva 14. Uusiobetonin sekoitusvaiheet (i) NMA – normaalissa sekoitusmenetelmässä, (ii) TSMA – kaksivaiheisessa sekoitusmenetelmässä (Tam ym. 2005).

Betonin lujuus paranee käytettäessä kaksivaiheista sekoitusmenetelmää (TSMA) verrattuna normaaliin sekoitusmenetelmään (NMA). Kaksivaiheisen sekoitusmenetelmän ensimmäisessä vaiheessa sekoitettu vesi muodostaa uusiokiviainespartikkelin pinnalle ohuen sementtilietekerroksen, joka imeytyy alkuperäiseen huokoiseen sementtipastaan

ja täyttää vanhat halkeamat ja huokokset. Sekoituksen toisessa vaiheessa loppuveden lisäämisellä täydennetään sementin hydrataatioprosessi. Tällä menetelmällä syntyy vahvempi tartuntavyöhyke uusiokiviaineksen ja sementtipastan välille. Tutkimusten avulla on saatu vahvistus sille, että sideaineen ja kiviaineksen välisen sidoksen lujuuden kasvaessa myös betonin lujuus kasvaa. Mikrorakennetta arvioitaessa on myös havaittu, että kaksivaiheisen sekoituksen avulla on saatu paljon parempi tartuntavyöhyke verrattaessa normaaliin sekoitustapaan. Tartuntavyöhykkeet on esitetty kuvissa 15 ja 16. (Tam & Tam 2007, Tam ym. 2007.)



Kuva 15. Tartuntavyöhyke betonissa, joka on sekoitettu kaksivaiheisesti (TSMA). Mitä lujempi tartuntavyöhyke on, sitä vaikeammin se on silmämääräisesti erotettavissa. (Tam ym.2007.)

Kuva 16. Tartuntavyöhyke betonissa, joka on sekoitettu normaalisti yhdessä vaiheessa (NMA) (Tam ym. 2007).

4.1.2 Uusiobetonin ominaisuudet

Yleistä

Uusiokiviaineksen käyttöä betonin raaka-aineena ja sen vaikutuksia betonin ominaisuuksiin on tutkittu laajasti viime vuosikymmeninä. Betonimurskeen hyödyntäminen uusiobetonissa on erityisen hyödyllistä ja luotettavaa silloin, kun murske valmistetaan ominaisuuksiltaan ja lujuudeltaan hyvästä lähdemateriaalista. Uusiobetonin halutut ominaisuudet eivät merkittävästi muutu, jos luonnonkiviainesta korvataan 10–30 % uusiokiviaineksella. (Betonikeskus 2005.)

Tuoreen betonin ominaisuudet

Tuoreen betonin ominaisuuksia tutkittaessa selvitetään uusiokiviaineksen käytön vaikutuksia betonimassan työstettävyyteen, tiheyteen ja ilmamäärään.

Betonimassan työstettävyys on tärkeä ominaisuus ja vaikuttaa usein myös muihin betonin ominaisuuksiin. Työstettävyyden määrittämiseen käytetään useimmin painumakoetta. Uusiobetonin painuman tulisi olla alhaisempi kuin tavanomaisen betonin johtuen uusiokiviaineksen korkeammasta vedenimukyvystä sekä uusiokiviaineksen kulmikkaammasta raemuodosta. Useissa tutkimuksissa alhaista työstettävyyttä on pyritty parantamaan lisäämällä veden määrää massassa. (De Brito & Saikia 2013 s. 229–236.)

Tutkimuksessa on tutkittu uusiokiviaineksen kosteustilan vaikutusta massan työstettävyyteen. Uusiokiviainesta on tutkimuksessa käytetty kolmessa eri kosteustilassa ilma-kuivattuna (AD), uunikuivattuna (OD) ja kyllästettynä pintakuivattuna (SSD). Tutkimuksen mukaan kiviaineksen kosteustilalla on vaikutusta painumaan ja painuman muutosnopeuteen. Uunikuivatuille kiviaineksille tuoreen betonin painuma on suurin ja työstettävyys heikkenee nopeimmin. Kahden muun kosteustilan kiviaineksia käytettäessä betonimassan painuman arvo sekä painuman aleneminen ovat normaaleja. Varhaisen painuman arvo on riippuvainen betonimassassa olevan vapaan veden määrästä. (Poon ym. 2004.)

Uusiobetonin työstettävyyden parantamiseksi on kehitetty useita keinoja, kuten

- veden määrän lisääminen betonimassaan vastaamaan kuivan uusiokiviaineksen tarvetta
- uusiokiviaineksen esikostutus ennen käyttöä
- lisätä uusiokiviaineksen kosteuspitoisuutta peittämällä se muovikalvolla, joka estää kosteuden normaalin haihtumisen
- kasvattaa notkistimen tai nesteyttimen määrää
- kasvattaa sementin määrää. (De Brito & Saikia 2013 s. 229–236.)

Käyttämällä uusiobetonissa lisäaineena notkistinta tai nesteytintä saadaan kasvatettua painumaa eli tuore massa on notkeampaa. Tutkimuksessa on valmistettu koebetoneita ilman lisänotkistusta, notkistinta käyttäen ja nesteytintä käyttäen. Notkistimen tehtävänä uusiobetonissa on vähentää vesimäärää ja saavuttaa uusiobetonille parempi työstettä-

vyys ja paremmat mekaaniset ominaisuudet. Mitä suurempi prosenttiosuus luonnonkiviainesta halutaan korvata uusiokiviaineksella, sitä tärkeämpää notkistimen käyttö on. Tutkimuksessa havaittiin notkistimen käytön alentavan tarvittavaa vesimäärää saman painuma-arvon saamiseksi. Täten myös betonin vesi-sideainesuhde pienenee, mikä taas parantaa uusiobetonin mekaanisia ominaisuuksia. (Barbudo, A. ym. 2013.)

Tuoreen betonin tiheys on tuoreen normaalisti tiivistetyn betonin massa tilavuusyksikköä kohden. Betonin tiheys riippuu monista tekijöistä kuten kiviaineksesta, sementtityypistä, vesitilavuudesta ja huokostilavuudesta. Betonin tiheys määrää monia kovettuneen betonin ominaisuuksia, koska yleisesti alhainen tuoreen betonin tiheys viittaa alhaisempaan kovettuneen betonin lujuuteen, koska vesi- ja huokospitoisuudet ovat suurempia, kun tiheys on alhaisempi. (De Brito & Saikia 2013 s. 235–236.)

Uusiobetonin tiheydet ovat hieman alhaisempia kuin tavanomaisella betonilla, koska uusiokiviainesrakeiden tiheydet ovat luonnonkiviainesta alhaisempia. Muutokset tiheyteen ovat kuitenkin yleisesti maltillisia. Eräässä tutkimuksessa on havaittu, että korvattaessa kaikki karkea luonnonkiviaines uusiokiviaineksella tuoreen betonin tiheys on alentunut vain 5 %. (De Brito & Saikia 2013 s. 235–236.)

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Uusiokiviaineksen ominaisuudet eroavat luonnonkiviaineksesta, joten myös uusiokiviaineksen lisäys betonimassaan vaikuttaa kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Kovettuneen uusiobetonin ominaisuudet ovat yhteydessä siihen, minkä laatuista uusiokiviainesta betonissa on käytetty. (De Brito & Saikia 2013 s. 241.)

Yleisesti uusiobetonin puristuslujuus on alhaisempi kuin tavanomaisen betonin. Kuitenkin useat tutkimukset ovat osoittaneet, että vaikutus puristuslujuuteen on merkityksetön, kun uusiokiviaineksella (karkea tai hieno) korvataan karkeaa luonnonkiviainesta 30 % tai sen alle. Alhaisempi puristuslujuus suhteessa tavanomaiseen betoniin aiheutuu pääosin korkeammasta huokoisuudesta (uusiokiviaines on huokoisempaa kuin luonnonkiviaines) sekä heikosta kiviaineksen ja sementtipastan välisestä sidoksesta. (De Brito & Saikia 2013 s. 241–260.)

Lujuuden alenemista pyritään hallitsemaan erilaisilla keinoilla, kuten vesi-sideainesuhdetta alentamalla, muuttamalla sekoitusmenetelmää tai käsittelemällä uusiokiviainesta. Sekoitusmenetelmän valinnalla on saatu parhaita tuloksia uusiobetonin ominaisuuksissa huolimatta valmistuksessa käytetyn uusiokiviaineksen tyypistä. (De Brito & Saikia 2013 s. 241–260.)

Vastaavasti kuin uusiobetonin puristuslujuus on alhaisempi kuin tavanomaisen betonin, myös sen taivutuslujuus on alhaisempi. Lujuudet heikkenevät, mitä enemmän uusiokiviainesta betonissa on käytetty korvaamaan luonnonkiviainesta. Joissain tutkimuksissa on havaittu, että jälkihoidolla saadaan uusiobetonin lujuudet jopa paremmiksi kuin tavanomaisessa betonissa. Syy korkeammille lujuuksille liittyy todennäköisesti mikrorakenteen parantumiseen, koska huolellinen jälkihoito vahvistaa uuden sementtipastan ja uusiokiviaineksen välisen tartuntavyöhykkeen lujuutta. (De Brito & Saikia 2013 s. 260–276.)

Uusiobetonin kimmomoduuli on normaalisti alhaisempi kuin tavanomaisen betonin. Kimmomoduulin alentumiseen vaikuttavat esimerkiksi betonin jäykkyyden alenemat, joka riippuu huokoisuudesta ja sementtipastan sidoksista sekä yksinkertaisesti se, että uusiokiviaineksen kimmomoduuli on luonnonkiviainesta alhaisempi. (De Brito & Saikia 2013 s. 276–285.)

Uusiobetonin lujuutta voidaan parantaa eri tekniikoilla. Esimerkiksi sementin korvaaminen tietyllä määrällä seosaineita, kuten lentotuhka, masuunikuona ja silika voivat parantaa lähes kaikkia betonin ominaisuuksia. (De Brito & Saikia 2013 s. 241–260.)

Tutkimuksessa on selvitetty uusiokiviaineksen kosteustilan vaikutusta kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Uusiokiviainesta on tutkimuksessa käytetty kolmessa eri kosteus-tilassa ilmakeivattuna (AD), uunikeivattuna (OD) ja kyllästettynä pintakeivattuna (SSD). Uusiobetonilla, jossa on käytetty ilmakeivattua eli niin sanotusti normaalissa kosteus-tilassa olevaa uusiokiviainesta, puristuslujuus oli korkein. Käytettäessä kyllästettyä ja pintakeivattua kiviainesta, havaittiin kovettuneen betonin puristuslujuuksissa alenemaa. Kiviainepartikkeleiden korkea kosteuspitoisuus aiheuttaa sen, että valuvaiheessa partikkeleiden pinnalta niin sanotusti valuu vettä, jolloin partikkeleiden ympärille aiheutuu suhteellisen korkea vesi-sementtisuhde. Tämä prosessi heikentää sementin ja uusiokiviaineksen tartuntaa. Uunikeivatusta uusiokiviaineksesta valmistetun uusiobe-

tonin lujuudet olivat myös selvästi alhaisempia kuin parhaat lujuustulokset. (Poon ym. 2004)

Sekoitusmenetelmän vaikutus uusiobetonin ominaisuuksiin

Eri sekoitusmenetelmillä valmistetuille betoneille on tehty betonin ominaisuuksien vertailua. Tutkimuksessa uusiokiviainesta korvattiin laajasti eri prosenttiosuuksilla välillä 0–100 %, jotta voitiin matemaattisesti optimoida prosenttiosuudet, joilla luonnonkiviainesta voidaan hyvin korvata uusiokiviaineella. Tutkimuksessa havaittiin, että lujuustulokset olivat systemaattisesti parempia kaikilla uusiokiviaineen prosenttiosuuksilla betoneilla, jotka oli valmistettu kaksivaiheisen sekoituksen avulla verrattuna normaaliin yhdessä vaiheessa tehtävään veden lisäykseen. Kaksivaiheista sekoitusmenetelmää käytettäessä parhaat tulokset saadaan, kun luonnonkiviainesta korvataan uusiokiviaineella 25–40 %. Uusiokiviainesta korvattaessa osuuksilla 50–70 % ei enää selkeää parannusta ominaisuuksissa suhteessa sekoitusmenetelmään havaittu. (Tam ym. 2005, Tam ym. 2007.)

Sekoitusmenetelmän vaikutuksia uusiobetonin kestävyys- ja säilyvyyteen on tutkittu korvattaessa uusiokiviainesta eri prosenttiosuuksilla. Tutkimuksessa on tutkittu muodonmuutoksista kutistumaa ja virumaa ja läpäisevyyksistä veden, ilman ja kloridien läpäisevyyttä. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että kaksivaiheinen sekoitus on tehokas menetelmä myös uusiobetonin kestävyys- ja säilyvyyden parantamiseksi. Kaksivaiheisen menetelmän positiiviset vaikutukset uusiobetonin lujuusominaisuuksiin ja kestävyys- ja säilyvyyteen antaa uusia mahdollisuuksia uusiobetonin käyttökohteiden kehittämiseen. (Tam & Tam 2007.)

Purkubetonin laadun vaikutus uusiobetonin ominaisuuksiin

Uusiokiviaineen raaka-aineen eli purkubetonin laadulla on vaikutusta uusiokiviaineen ominaisuuksiin. Tästä on olemassa useita tutkimuksia.

Uusiobetonille on tehty tutkimus, joissa uusiokiviainesten lähtöbetonin lujuusluokka on tiedossa. Tutkimuksessa tehtiin erilaisia betoneita kolmella eri tavoitelujuudella: 20 MPa, 45 MPa ja 65 MPa. Kiviaines valmistettiin kahdella eri murskausmenetelmällä. Uusiokiviaineen raaka-aineina ovat laboratoriossa valmistetut kolmen eri lujuusluo-

kan betonit sekä betonielementtitehtaalta ylijääneet kolmen eri lujuusluokan betonit. Koebetoneissa käytettiin kiviainesta fraktioissa 0–22,4 mm. Hienoin kiviainesfraktio oli luonnonkiviainesta kaikissa koebetoneissa. Kaikissa massoissa, joissa käytettiin uusiokiviainesta, korvattiin luonnonkiviaines 100-prosenttisesti. (Pedro et al. 2014.)

Koebetonien testauksessa havaittiin, että käytettäessä 100 % uusiokiviainesta korvaamassa luonnonkiviainesta, puristuslujuudet ovat alentuneet. Tutkimuksessa havaittiin, että betoneissa, joiden tavoitelujuus on 45 MPa ja 65 MPa puristuslujuuden alenema on selvästi pienempi kuin alhaisimman lujuusluokan (20 MPa) betonissa. Koebetonien kimmomoduulin havaittiin alenevan uusiokiviainesta sisältävissä betoneissa. Kimmomoduuli aleni vähiten betoneissa, joissa uusiokiviaineksen lähtöbetoni on ollut korkealujuuksista. Tämä johtuu siitä, että tämän uusiokiviaineksen jäykkyys vastaa parhaiten luonnonkiviainesta ja vaikuttaa siten lievimmin kimmomoduuliin, mikä riippuu sementtipastan ja kiviainesten jäykkyydestä. Uusiokiviaineksen käyttö johti betonin vedenimukyyn kasvamiseen. Uusiokiviaineksen lähdemateriaalin laadulla havaittiin olevan siihen merkittävä vaikutus, sillä vedenimukyky alhaisen lujuuden betonista valmistetulla uusiokiviaineksella on korkein. Betonin kutistumat eri lujuuksilla olivat suurempia uusiokiviaineksestä valmistetuissa betoneissa kuin vertailubetonissa. Kutistuman kasvulla ei havaittu kuitenkaan yhteyttä lähdemateriaalin lujuuteen. (Pedro et al. 2014.)

4.2 Uusiobetonin kokeellinen tutkimus

4.2.1 Yleistä

Diplomityön toisen vaiheen kokeellisessa tutkimuksessa selvitetään uusiobetonin ominaisuuksia ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Kokeellisella tutkimuksella pyritään optimoimaan uusiobetonin reseptiä siten, että betonimurskeella voidaan korvata mahdollisimman paljon luonnonkiviainesta huonontamatta kuitenkaan betonin laatua.

Uusiobetonissa käytettiin uusiokiviaineksena diplomityön ensimmäisessä vaiheessa purkujätteestä valmistettua betonimursketta. Betonimurskeelle määritettyjen vedenimukyyn, kosteuspitoisuuden sekä tiheyden tuloksia hyödynnettiin uusiobetonin koostumuksen suunnittelussa. Ominaisuudet otettiin huomioon myös betonin valmistusprosessin yksityiskohtien suunnittelussa.

Uusiobetonin kokeellisia tutkimuksia varten vertailumassan lisäksi valmistettiin viisi koemassaa, joissa luonnonkiviainesta korvattiin uusiokiviaineksella eri prosenttiosuuksin. Uusiobetonin valmistuksessa käytettiin kaikkia kolmea uusiokiviaineslajitetta, jotka ovat # 16–32 mm, # 8–16 mm ja # 0,125–8 mm. Kokeellisessa tutkimuksessa painotettiin kuitenkin karkeimpien lajitteiden käyttöä, joten hienointa lajitetta käytettiin vain yhdessä koemassassa.

Vertailumassan ja koemassojen perustana on Ruskon Betoni Oy:ltä saatu kaupallinen betoniresepti. Betoniresepti valittiin haluttujen ominaisuuksien ja betonin valmistajan kanssa käytyjen keskustelujen perusteella. Kokeellisen vaiheen resepti kehitettiin anturavaluihin käytettävästä C25/30-luokan rakennebetonista, jonka valmistuksessa käytetään myös karkeinta kiviaineslajitetta (# 16–32 mm). Kyseisessä anturabetonissa lujuusluokkatavoite on alhaisempi ja maksimiraekoko on suurempi kuin muissa rakennebetoneissa, joten sen valmistuksessa voitaisiin turvallisesti hyödyntää uusiokiviainesta. Karkein lajite olisi betonin valmistajan mukaan helpoin korvata uusiokiviaineksella, sillä sen laatuvaatimukset eivät ole hienompiin lajitteisiin verrattuna niin korkeat.

Vertailumassalle ja koemassoille tehtiin laboratoriokokeita. Tuoreille betonimassoille määritettiin tiheys, massan lämpötila, ilmapitoisuus ja painuma. Lisäksi massalle tehtiin silmämääräinen arviointi esimerkiksi valettavuuteen liittyen. Kovettuneelle betonille, eli valetuille koekappaleille määritettiin tiheydet, taivutuslujuudet ja puristuslujuudet. Koekappaleille tehtiin myös silmämääräinen arviointi. Lisäksi viiden koekappaleen betonin koostumus ja rakenne määritettiin ohuthietutkimuksella Vahanen Oy:n betonilaboratoriossa.

Betonivalut ja laboratoriokokeet on suoritettu Aalto-yliopiston betonilaboratoriossa. Kaikki tässä työssä suoritettut laboratoriokokeet ovat standardisoituja, ja käytetyt työvälineet täyttävät kyseistä välinettä koskevat standardien edellyttämät vaatimukset.

4.2.2 Koejärjestelyt

4.2.2.1 Uusiobetonin massojen koostumus

Materiaalit

Kokeellisessa tutkimuksessa valmistettujen betonimassojen raaka-aineina ovat luonnonkiviainekset, uusiokiviainekset, sementti ja vesi. Lisäaineita ei koemassoissa käytetty. Kiviainekset ja sementti on säilytetty sisätiloissa kannella peitettynä normaalissa huonelämpötilassa.

Massoissa käytettiin pääosin luonnonkiviainesta, jota oli valmiiksi Aalto-yliopiston betonilaboratoriossa. Luonnonkiviaineksen karkeinta lajitetta (# 16–32 mm) betonimassojen varten saatiin Ruskon Betoni Oy:ltä. Luonnonkiviaineksilla tarkoitetaan kaikkia mineraalisia kiviaineksia, joita valmistettaessa on käsitelty vain mekaanisesti (BY 43 2008). Määrite käsittää luonnonsoran, soramurskeen sekä kalliomurskeen. Kaikista koemassoihin käytetyistä kiviaineksista oli tiedossa niiden rakeisuudet. Rakeisuuksien perusteella määritettiin eri lajitteiden suhteet siten, että rakeisuuskäyrä saatiin mahdollisimman hyvin vastaamaan alkuperäisessä betonireseptissä ollutta rakeisuuskäyrää. Kaikissa betonimassoissa käytettiin seitsemää eri luonnonkiviaineslajitetta: # 16–32 mm, # 8–16 mm, # 5–10 mm, # 2–5 mm, # 1–2 mm, # 0,5–1,2 mm ja # 0,1–0,6 mm. Hienointa kiviainesta, niin kutsuttua filleriä, ei massoissa käytetty lainkaan.

Massoissa käytettiin uusiokiviaineslajitteina tämän diplomityön ensimmäisessä vaiheessa valmistettua ja seulottua mursketta. Koebetoneissa painotettiin karkeimpien uusiokiviaineslajitteiden käyttöä. Uusiokiviaineslajitteen rakeisuuskäyrää ei ole, joten sitä ei ole huomioitu betonin koostumuksen suunnittelussa. Uusiokiviaineksen ominaisuudet on saatu kokeellisesti, ja ne on esitetty tämän diplomityön luvussa 3.2.3. Kyseisiä materiaaliominaisuuksia on hyödynnetty betonin koostumuksen ja valmistusprosessin yksityiskohtien suunnittelussa. Uusiokiviainesta ei ole pesty tai kuivatettu ennen käyttöä, vaan kiviaines on käytetty massoihin sellaisenaan kolmena eri lajitteena: # 16–32 mm, # 8–16 mm ja # 0,125–8 mm.

Betonin sideaineena kaikissa massoissa käytettiin Finnsementti Oy:n valmistamaa Plussementtiä CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N. Betonimassojen valmistukseen käytetty vesi oli Espoon vesijohtovettä, jonka lämpötila oli asetettu 19 °C:een.

Koekappaleet

Tässä kokeellisessa osassa valmistetuista betonimassoista haluttiin valmistaa taivutuslujuuden määrittämistä varten palkkeja neljä kappaletta kutakin massaa kohden. Taivutuslujuuskokeessa palkit taivutetaan murtoon ja ne rikkoutuvat kahteen osaan. Näistä jäljelle jääneistä palkkien päiden kappaleista tehdään puristuslujuuden määritykset, jolloin erilisiä koekuutioita ei tarvitse valaa.

Koekappaleiden vähimmäismitat määräytyvät standardista SFS-EN 12390-1. Koekappaleiden perusmitan tulee olla vähintään kolme ja puoli kertaa niin suuri kuin betonin kiviaineksen nimellisraekoko. Koska massoissa betonin nimellisraekoko on 32 mm, ja koekappale on palkki, tulee palkin poikkileikkausmitan olla 150 mm ja pituuden vähintään 525 mm. Vastaaville koekappaleille ei ollut olemassa valmiita muotteja, joten ennen valua valmistettiin koekappaleiden valua varten neljä muottia. Muoteilla saatiin valmistettua koekappaleita, joiden mitat olivat 150x150x530 mm. Muotit valmistettiin 18 mm:n vahvuisesta filmivanerista ja kasattiin ruuvikiinnityksellä. Muotit voitiin purkaa valun jälkeisenä päivänä ja kasata uudelleen seuraavan massan valua varten. (SFS 2013a.)

Yhden koekappaleen laskettiin vaativan betonimassaa noin 12 litraa, jolloin neljää koekappaletta varten massaa tarvittiin 48 litraa. Massaa tarvitaan myös tuoreelle betonille tehtäviä laboratoriokokeita varten, mutta todettiin, että ilmapitoisuuden ja painuman määrityksiin käytettyä massaa voidaan käyttää koekappaleiden valamiseen, kun massaa sekoitetaan käsin ennen valamista. Päätettiin valmistaa kustakin betonimassasta annos kooltaan 55 litraa.

Suhteitukset

Vertailumassan ja koemassojen reseptit laadittiin Ruskon Betoni Oy:ltä saatuun kaupalliseen betonireseptiin perustuen. Kyseessä on anturabetoniksi luokiteltu betoni, jonka lujuusluokka on C25/30 ja maksimiraekoko 32 mm. Suhteituslujuuden arvo on 29,0 MN/m² ja kiviaineksen rakeisuusluku on 500. Alkuperäisen reseptin painuman tavoitteena on 100 mm ja vesi-sementtisuhteen 0,58.

Suhteitus aloitettiin sillä, että yhdistettiin tässä tutkimuksessa käytettävien luonnonkiviainesten rakeisuudet ja pyrittiin löytämään sellaiset prosenttiosuudet eri kiviaineslajeille, että rakeisuusluku ja rakeisuuskäyrä vastaisivat mahdollisimman hyvin alkuperäisen reseptin yhdistettyä kiviainesta. Kokeilemalla eri prosenttiosuuksia, päästiin suhteellisen lähelle alkuperäistä rakeisuuskäyrää ja rakeisuusluvuksi tuli 501.

Kiviainesten yhdistämisen jälkeen saatiin laadittua vertailubetonille resepti, joka vastaa alkuperäistä betonireseptiä. Sementin, veden ja ilman määrät ovat samat kuin alkuperäisessä betonireseptissä. Vertailubetonin koostumus osa-aineittain betonikuutiota kohden työseokselle on esitetty alla olevassa taulukossa 7.

Taulukko 7. Vertailubetonin koostumus osa-aineittain kuutiota kohden sekä eri kiviaineslajeille käytetyt lyhenteet.

<i>osa-aine</i>	<i>lyhenne</i>	<i>tarkenne</i>	<i>työseos [kg/m³]</i>
Sementti	-	-	330
Kiviaines	NA-0,1/0,6	luonnonkiviaineslajite # 0,1–0,6 mm	293
Kiviaines	NA-0,5/1,2	luonnonkiviaineslajite # 0,5–1,2 mm	219
Kiviaines	NA-1/2	luonnonkiviaineslajite # 1–2 mm	329
Kiviaines	NA-2/5	luonnonkiviaineslajite # 2–5 mm	256
Kiviaines	NA-5/10	luonnonkiviaineslajite # 5–10 mm	219
Kiviaines	NA-8/16	luonnonkiviaineslajite # 8–16 mm	201
Kiviaines	NA-16/32	luonnonkiviaineslajite # 16–32 mm	188
Kiviaines	RCA-0,1/8	uusiokiviaineslajite # 0,1–8 mm	0
Kiviaines	RCA-8/16	uusiokiviaineslajite # 8–16 mm	0
Kiviaines	RCA-16/32	uusiokiviaineslajite # 16–32 mm	0
Vesi	-	-	112

Koemassat suunniteltiin siten, että karkeinta kiviainesta korvataan enemmän kuin muita lajitteita. Koemassojen koostumuksen suunnittelussa pyrittiin muuttamaan vain yksittäisiä asioita kerrallaan. Uusiokiviaineen prosenttiosuuksia ja eri lajitteiden käyttöä muutettiin eri betoneille siten, että koetuloksista ja massan valettavuuden arvioinnissa voitiin nähdä muutosten vaikutukset betonin ominaisuuksissa. Taulukossa 9 on esitetty, millaisilla prosenttiosuuksilla uusiokiviaineslajitetta on käytetty korvaamaan vastaavaa luonnonkiviaineslajitetta ja taulukossa 8 on esitetty uusiokiviaineen prosenttiosuus koko kiviainesmäärästä kussakin koebetonissa.

Taulukko 8. Uusiokiviaineksen prosenttiosuus koko kiviainesmäärästä eri betoneissa.

<i>osa-aine</i>	<i>vertailu- massa</i>	<i>koe- massa 1</i>	<i>koe- massa 2</i>	<i>koe- massa 3</i>	<i>koe- massa 4</i>	<i>koe- massa 5</i>
luonnonkiviaines	100 %	93,8 %	87,5 %	94,9 %	89,8 %	86,2 %
uusiokiviaines	0 %	6,2 %	12,5 %	5,1 %	10,2 %	13,8 %

Taulukko 9. Koemassat ja eri lajitteiden prosenttiosuudet. Prosenttiosuus kertoo kuinka suuri osuus uusiokiviaineslajitteella korvattiin vastaavaa luonnonkiviaineslajitetta.

<i>osa-aine</i>	<i>vertailu- massa</i>	<i>koe- massa 1</i>	<i>koe- massa 2</i>	<i>koe- massa 3</i>	<i>koe- massa 4</i>	<i>koe- massa 5</i>
RCA-0,1/8	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	10 %
RCA-8/16	0 %	0 %	0 %	20 %	40 %	40 %
RCA-16/32	0 %	40 %	80 %	20 %	40 %	20 %

Betonin koostumuksen suunnittelussa on käytetty joitakin oletuksia tai lähtöarvoja perustuen kirjallisuuteen ja tämän diplomityön ensimmäisen vaiheen kokeellisiin tutkimuksiin. Kiintotiheyden arvoina suhteituksessa käytettiin luonnonkiviaineslajitteille 2,67 Mg/m³ sekä sementille 3,10 Mg/m³, koska arvot ovat samoja kuin alkuperäisessä reseptissä ja vastaavat yleisesti kyseisille aineksille käytettyjä arvoja.

Betoniin lisättävän veden määrään vaikuttaa kiviainesten vesipitoisuus. Luonnonkiviainesten vesipitoisuus määritettiin kokeellisesti, ja sen arvoksi valittiin 0,20 %, lukuun ottamatta karkeinta lajitetta, jonka vesipitoisuuden arvo 1,0 % saatiin suoraan alkuperäisestä reseptistä. Uusiokiviaineslajitteille vesipitoisuuden arvoksi valittiin 1,0 % tehtyihin laboratoriokokeisiin perustuen. Koska kaikki kiviainekset sisältävät vapaata vettä, lisättävän veden määrä pieneni alkuperäisestä arvosta.

Koemassojen koostumus määriteltiin osa-aineittain betonikuutiota kohden. Lopullinen resepti saadaan, kun osa-aineiden kuutiomassat kerrotaan annoskoolla, joka on jokaisessa massassa 55 litraa (0,055 m³). Taulukossa 10 on esitetty kaikkien massojen valmiit reseptit, jonka mukaan massat valmistettiin.

Taulukko 10. Vertailumassan ja koemassojen valmiit reseptit 55 litran annokselle.

<i>osa-aine</i>	<i>vertailu- massa</i>	<i>koe- massa 1</i>	<i>koe- massa 2</i>	<i>koe- massa 3</i>	<i>koe- massa 4</i>	<i>koe- massa 5</i>
	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
Sementti	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2	18,2
NA-0,1/0,6	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	14,5
NA-0,5/1,2	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	10,1
NA-1/2	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	16,3
NA-2/5	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	12,7
NA-5/10	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	10,9
NA-8/16	11,1	11,1	11,1	8,9	6,6	6,6
NA-16/32	17,2	10,3	3,4	14,8	10,3	13,8
RCA-0,1/8	0	0	0	0	0	6,6
RCA-8/16	0	0	0	2,0	4,0	4,0
RCA-16/32	0	6,2	12,4	3,1	6,2	3,1
Vesi	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,0

Uusiokiviaineksen vedenimukyky on suurempi kuin luonnonkiviaineksen. Massojen suunnittelussa otettiin tämä huomioon, sillä korkeamman vedenimukyvyn omaava kiviaines saattaisi imeä vettä massasta itseensä, eikä vettä näin ollen riittäisi tarpeeksi sementin hydrataatioprosessiin. Kiviaineksen vedenimukyvyn hallitsemiseksi päätettiin lisätä massan vesimäärää, ja siten kostuttaa uusiokiviaines ennen sementin lisäämistä. Tässä työssä laskennallinen lisäveden määrä lopullisessa koemassassa on 4–5 % uusiokiviaineksen massasta. Näin ollen lisäveden määrä laskettiin erikseen jokaiselle koebetonille.

4.2.2.2 Uusiobetonin valmistus ja säilytys

Vertailubetoni valmistettiin normaalin betonimassan tavoin. Koemassat, joissa on mukana uusiokiviainesta, valmistettiin hieman eri tavalla. Kaikki koemassat valmistettiin kuitenkin samalla valmistusprosessilla.

Vertailubetonin valmistus aloitettiin punnitsemalla tarkasti kiviainekset suurimmasta raekoosta aloittaen. Kiviaineslajitteet kaadettiin punnitsemisen jälkeen sekoittimeen. Kiviainesten jälkeen punnittiin ja lisättiin sekoittimeen sementti. Tämän jälkeen ennen veden lisäämistä seoksen kuivia aineita sekoitettiin koneellisesti 30 sekunnin ajan tasai-

semman massan aikaansaamiseksi. Sitten massaan lisättiin vesi ja sekoittamista jatkettiin kolmen minuutin ajan.

Koemassojen valmistus poikkeaa vertailubetonin valmistuksesta, koska uusiokiviaineksen korkeammasta vedenimukyvyystä johtuen pyritään tasaamaan kiviainesten kosteustila ennen sementin lisäämistä. Massojen valmistus aloitettiin punnitsemalla tarkasti kiviainekset suurimmasta raakoosta aloittaen. Kiviaineslajitteet, luonnonkiviaines ja uusiokiviaines, kaadettiin punnituksen jälkeen sekoittimeen ja sekoitettiin koneellisesti 30 sekunnin ajan. Tämän jälkeen sekoittimeen lisättiin kiviainesten joukkoon puolet koko massaan suunnitellusta vesimäärästä (laskennallinen vesimäärä sekä lisäveden määrä), minkä jälkeen sekoitettiin koneellisesti 30 sekunnin ajan. Kosteaa vesi-kiviaines-massa, joka on esitetty kuvassa 17, jätettiin neljän minuutin ajaksi tasaantumaan, jotta vesi pääsi imeytymään kuiviin kiviaineksiin. Tasaantumisaajan jälkeen punnittiin sementti ja lisättiin se sekoittimen kosteaan kiviainesmassaan. Sementin lisäämisen jälkeen massaa sekoitettiin 30 sekunnin ajan. Tämän jälkeen massaan lisättiin loput vesimäärästä ja jatkettiin sekoittamista kolmen minuutin ajan.



Kuva 17. Uusiobetonin kiviainekset, joihin on sekoitettu puolet kokonaisvesimäärästä.

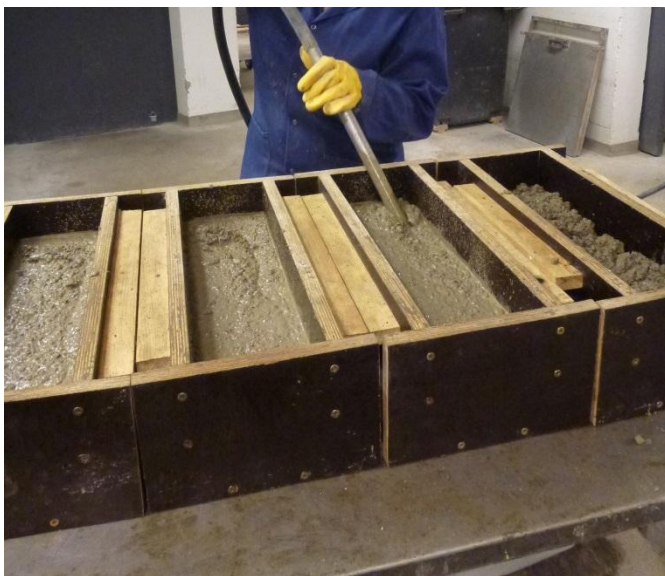
Sekoituksen jälkeen mitattiin valmiin massan lämpötila. Ennen koekappaleiden valmistamista määritettiin tuoreelle massalle painuma, tiheys ja ilmamäärä standardien EN

12350-2, EN 12350-6 ja EN 12350-7 mukaisesti (SFS 2009a, SFS 2009b, SFS 2009c). Valokuva valmiista massasta on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Valmis uusiobetonimassa sekoittimessa.

Koekappaleet valettiin öljyttyihin muotteihin siten, että ensin muotti täytettiin puolilleen ja massaa muotissa tiivistettiin sauvatäryttimellä. Sitten muotit täytettiin massoilla ja tiivistettiin uudelleen. Lopuksi vielä tasattiin koekappaleen pinta ja ylimääräinen massa poistettiin kappaleen pinnalta. Työvaiheita valokuvina on esitetty kuvissa 19 ja 20.



Kuva 19. Massa tiivistettiin sauvatäryttimellä kahdessa vaiheessa.



Kuva 20. Koekappaleiden valupinnat on tasattu.

Koekappaleet peitettiin muovilla ja jätettiin kovettumaan. Seuraavana päivänä koekappaleiden muotit purettiin ja koekappaleet siirrettiin säilytykseen tilaan, jossa ilman suhteellinen kosteus on asetettu standardin mukaiseksi.

4.2.2.3 Uusiobetonin testaus

Tuore betoni

Tuoreen betonin tiheys määritettiin standardin EN 12350-6 mukaisesti. Tiheyden määrittämiseen käytetään astiaa, jonka tilavuus on tunnettu ja joka punnittiin tyhjänä ennen koetta. Astia täytettiin betonimassalla kolmessa erässä siten, että jokaisen täytön jälkeen massaa astiassa tiivistettiin tärypöydän avulla. Lopuksi massa tasattiin astian yläreunan tasalle teräslastaa ja tasoitusviivainta apuna käyttäen sekä astian reuna ja ulkopinta pyyhittiin puhtaaksi. Tämän jälkeen massa ja astia punnittiin. (SFS 2009b.)

Betonimassan ilmamäärä määritettiin standardin EN 12350-7 mukaisella vesipatsasmenetelmällä, jonka laitteisto on esitetty kuvassa 21. Ilmamäärän mittauksessa teräksinen säiliö täytetään betonimassalla. Ilmamäärän määrittämisessä käytetään säiliönä tiheyden määrittämisessä betonimassalla täytettyä astiaa. Betonimassan pinta tasattiin säiliön yläpinnan tasolle, ja säiliön reunat pyyhittiin huolellisesti puhtaiksi. Kansilaitteisto nostettiin säiliön päälle ja kiristettiin paikoilleen. Mittarin näyttämä säädettiin alkutilanteeseen

oikeaksi. Laitteistoa täytettiin vedellä toisen venttiilin kautta niin pitkään, että toisesta venttiilistä valui tasaisesti vettä. Sitten venttiilit suljettiin ja ilmamäärä testattiin laitteistolla. (SFS 2009c.)



Kuva 21. Tuoreen betonin ilmamäärän mittaus.

Betonimassan notkeuden määrittämiseksi tehtiin tuoreelle betonille painumakoe standardin SFS-EN 12350-2 mukaisesti. Muotti asetettiin tukevasti pohjalevyn päälle tasaiselle alustalle. Muotti täytettiin kolmessa osassa siten, että kukin täyttökerros tiivistettiin 25 sulloinsauvan iskulla. Kun muotti oli täytetty, betoni pinta tasattiin sulloinsauvan avulla. Varsinainen painumakoe suoritetaan siten, että muotti nostetaan pois paikoiltaan tasaisella nopeudella ja kohtisuoraan ylöspäin. Painuma mitattiin välittömästi muotin poistamisen jälkeen, määrittämällä muotin korkeuden ja kokoon painuneen massan korkeimman kohdan erotus. Koejärjestely on esitetty kuvan 22 valokuvassa. (SFS 2009a.)



Kuva 22. Tuoreen betonin painumakoe on suoritettu.

Standardin mukaisten kokeiden lisäksi massalle tehtiin silmämääräisiä arvioita sekä massan valettavuutta arvioitiin koekappaleita valettaessa.

Kovettunut betoni

Koekappaleita säilytettiin jälkihoituhuoneessa 28 vuorokauden ajan, minkä jälkeen koekappaleille tehtiin lujuuskokeet. Koekappaleet mitattiin ja punnittiin aluksi, jolloin saatiin laskettua betonin tiheys.

Koekappaleille tehtiin taivutuslujuuden määritykset standardin EN 12390-5 mukaisesti. Ennen testausta koekappaleiden pinnat tasoitettiin hiomalla ja testauskoneen pinnat pyyhittiin puhtaaksi. Koekappale asetettiin koneeseen keskitetysti ja siten, että kuormitussuunta on koekappaleen valusuuntaan nähden kohtisuorassa, kuten esitetty kuvassa 23. Sitten valittiin kuormitukselle tasainen kasvunopeus ja alkukuormitus ja käynnistettiin testaus. Kun murto saavutettiin eikä kuormaa voitu enää lisätä, kirjattiin muistiin suurin saavutettu kuorma. (SFS 2009e.)



Kuva 23. Kovettuneen betonin testaus – palkin taivutuskoe on käynnissä. Koestuksessa koekappale on asetettu siten, että betonivalun yläpinta on kohtisuorassa kuormitussuuntaan nähden.

Puristuslujuuden määritykset tehtiin standardin EN 12390-3 mukaisesti. Taivutuslujuuden määrityksessä kahteen osaan rikkoutuneet taivutuskokeen koekappaleet valmistettiin puristuslujuuden määrityksiä varten. Puristuslujuuskoekappaleet eivät olleet kuutioita, mutta koska niiden mitat yhtä mittaa lukuun ottamatta vastasivat 150 millimetrin kuution mittoja, voitiin niitä käyttää puristuslujuuden määritykseen sellaisinaan. Koekappaleiden ja testauskoneen pinnat puhdistettiin. Koekappale asetettiin koneeseen keskitetysti siten, että kuution mittoja vastaava osa eli taivutuspalkin pää kohdistettiin etureunan ja kuormituksen välilevyn kanssa samaan tasoon, kuten esitetty kuvassa 24. Välilevyn avulla saatiin kuormitus kohdistettua 150x150 mm:n alueelle. Koekappaleen kuormitusta kasvatettiin tasaisella nopeudella. Kun murtoraja ylittyy, kirjataan ylös suurin saavutettu kuorma. (SFS 2009d.)



Kuva 24. Kovettuneen betonin testaus – palkin puristushjuuskoe on käynnissä.

Lisäksi viidestä eri betonista teetettiin ohuthienäytteet mikroskooppitutkimusta varten.

4.2.3 Koetulokset

Tuoreen betonin ominaisuudet

Betonimassat valettiin laboratoriossa, jossa huonelämpötilaksi mitattiin 21,5 °C. Vertailumassan ja koemassojen lämpötilat mitattiin, ja ne on esitetty taulukossa 11.

Tuoreen betonin tiheyden määrittämisessä astia, jonka tilavuus tunnettiin, punnittiin tyhjänä ja massalla täytettynä. Tiheys saatiin laskettua alla olevan kaavan mukaisesti. Massoille määritetyt tiheydet olivat välillä 2350–2380 kg/m³. Tuoreen betonin ilmamäärä saatiin vesipatsasmenetelmällä ja sen arvo vaihtelee eri massoilla välillä 1,8–2,3 %. Tiheydet ja ilmamäärät eri massoille on esitetty taulukossa 11.

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (4)$$

missä	D	tuoreen betonimassa tiheys [kg/m ³]
	m ₁	tyhjän astian massa [kg]
	m ₂	tiivistetyllä betonilla täytetyn astian massa [kg]
	V	astian tilavuus [m ³]

Tuoreen betonin notkeus määritettiin painumakokeella. Painuman arvo eri massoilla vaihtelee välillä 15–28 mm, mikä vastaa notkeusluokkaa S1 eli kaikki massat ovat notkeudeltaan jäykkiä (BY 50 2012). Painuman arvot eri massoille on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Tuoreen betonin testauksen tulokset: massojen lämpötila, tiheys, ilmamäärä ja painuma.

	<i>lämpötila</i>	<i>tiheys</i>	<i>ilmamäärä</i>	<i>painuma</i>	<i>?</i>
	[°C]	[kg/m ³]	[%]	[mm]	
Vertailumassa	23,6	2380	2,1	24	
Koemassa 1	24,1	2370	2,1	28	
Koemassa 2	24,2	2350	1,8	20	
Koemassa 3	23,9	2370	2,2	25	
Koemassa 4	24,4	2350	2,0	20	
Koemassa 5	24,4	2350	2,3	15	

Vertailumassan havaittiin olevan jäykempi kuin oli tavoitteena alun perin betonin koostumuksen suunnittelussa. Massan koostumusta ei kuitenkaan muokattu, vaan koemassat valmistettiin siten, että niiden tuloksia voitiin verrata vertailumassaan. Koemassoista kahdella (massat 1 ja 3) painuman arvot olivat suurempia kuin vertailumassalla, eli ne olivat hieman notkeampia. Koemassassa 2, jossa karkeinta luonnonkiviaineslajitetta on korvattu 80% uusiokiviainesta valettavuus oli heikoin, koska massassa oli paljon kulumikkaita suuria uusiokiviainesrakeita. Koemassan 5, jossa oli käytetty kaikkia uusiokiviaineslajitteita, havaittiin myös olevan selvästi muita massoja jäykempää. Lisäksi koemassan 5 painumakokeessa havaittiin veden erottumista, mikä on esitetty kuvassa 25. Kaikki massat tiivistyivät hyvin täryttämällä ja silmämääräisesti veden erottumista tuoreen betonimassan pintaan ei valamisen yhteydessä havaittu.



Kuva 25. Veden erottumista painumakokeen aikana koemassassa 5.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Koekappaleille määritettiin tiheys, taivutuslujuus sekä puristuslujuus standardien mukaisesti. Taulukossa 12 on esitetty kyseiset koetulokset. Puristuslujuuskokeissa rinnakkaisia koetuloksia on kaikilla betoneilla kahdeksan kappaletta ja vastaavasti taivutuskokeessa koekappaleiden lukumäärä on neljä. Kuvassa 26 on esitetty palkkien murtopinnoista valokuva taivutuskokeen jälkeen.

*Taulukko 12. Kovettuneen betonin tiheydet, puristuslujuudet sekä taivutuslujuudet. Jo-
kaiselle betonille tehtiin rinnakkaisia puristuslujuusmäärittäviä kahdeksan kappaletta
ja taivutuslujuuden määrittäviä neljä kappaletta.*

	<i>tiheys</i> <i>keskiarvo</i> [kg/m ³]	<i>puristuslujuus</i> <i>keskiarvo</i> [N/mm ²]	<i>puristuslujuus</i> <i>vaihteluväli</i> [N/mm ²]	<i>taivutuslujuus</i> <i>keskiarvo</i> [N/mm ²]	<i>taivutuslujuus</i> <i>vaihteluväli</i> [N/mm ²]
Vertailumassa	2340	36,1	33,6–37,5	4,8	4,4–5,3
Koemassa 1	2350	33,9	32,6–35,7	4,8	4,6–5,2
Koemassa 2	2350	35,1	31,7–38,0	5,1	4,9–5,3
Koemassa 3	2360	34,9	33,6–36,4	5,1	4,8–5,6
Koemassa 4	2350	34,5	32,9–36,4	4,9	4,6–5,3
Koemassa 5	2340	33,8	33,0–35,8	4,8	4,4–5,3



Kuva 26. Palkkien murtopinnat taivutuskokeen jälkeen.

Ohuthieellä tarkasteltiin betonin rakennetta viidelle eri koekappaleelle. Koekappaleet valmistettiin vertailumassan lisäksi kaikille muille koemassoille lukuun ottamatta koemassaa 1.

4.2.4 Koetulosten tarkastelu

Tehtyjen kokeiden perusteella voitiin todeta, että uusiobetoni vastasi ominaisuuksiltaan hyvin vertailubetonia.

Betonien koostumus ja rakenne todettiin hyväksi, ja kaikki koekappaleet pystyttiin valamaan reseptien mukaan valmistetuilla massoilla. Kaikkien massojen ja koekappaleiden tiheys vastaa hyvin normaalin betonin tiheyttä. Massojen ilmamäärä vastasi hyvin suunnitteluarvoa 2 %.

Suhteituksessa betonin tavoitteelluksi notkeusluokaksi oli määritetty S3, eli vetelä, ja painumaksi 100 mm. Tämä tavoite ei täytynyt, mutta kaikki koemassat olivat samassa notkeusluokassa kuin vertailumassa, joten notkeuteen on saattanut vaikuttaa erot kiviainesten rakeisuudessa verrattuna Ruskon Betoni Oy:n massa (alkuperäinen resepti). Osalla koemassoista painuman arvo oli jopa vertailumassaa parempi. Koemassojen notkeuteen ei puututtu, jotta voitiin verrata betonien ominaisuuksia ja lujuuksia keskenään ja vertailumassaan. Mikäli massa lisätään notkistinta, saadaan lisättyä notkeutta muuttamatta kuitenkaan vesisementtisuhdetta.

Edellä mainitusta syystä johtuen massat olivat jäykkiä, mutta kaikki massat olivat valettavia ja tiivistyivät hyvin täryttämällä. Valupinnan tasoittaminen on hieman haastavaa johtuen jäykkyydestä ja suhteellisen suuresta maksimiraekoosta. Toisaalta maksimiraekoon ollessa 32 mm:n ja betonilaatuna C-luokan rakennebetoni, ei valupinnalle ole asetettukaan niin suuria laatuvaatimuksia.

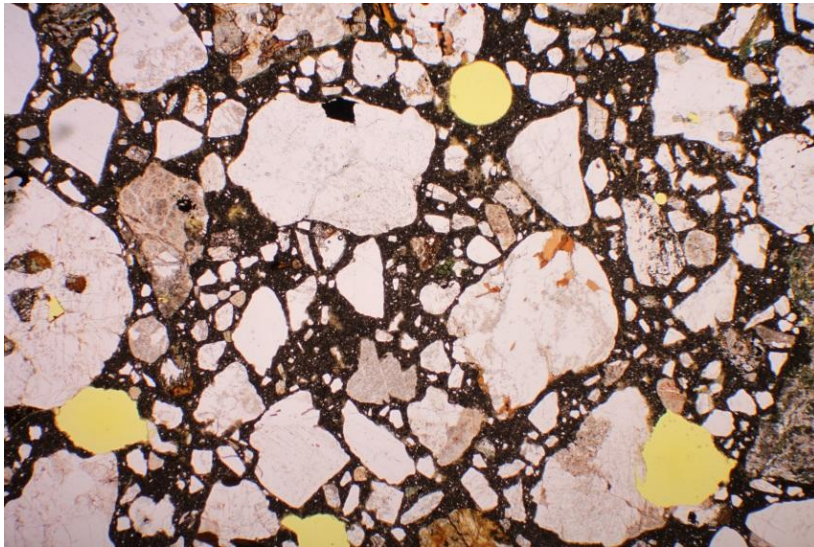
Verrattaessa vertailubetonin ja koebetonien kovettuneen betonin ominaisuuksia havaittiin, että erot olivat varsin pieniä. Tuloksiin perustuen ei voida väittää että uusiokiviaineksen käyttö betonissa selkeästi heikentäisi betonin ominaisuuksia.

Koebetonien tiheydet eivät suuresti eroa vertailubetonin tiheydestä. Kaikki koekappaleiden puristuslujuudet ylittivät nimellislujuuden 30 MPa. Koebetonien puristuslujuudet ovat hieman alemmat kuin vertailubetonilla, mutta erot ovat varsin pieniä. Lujuustuloksista nähdään, että koemassan 5 puristuslujuuden alenema on suurin. Lujuuden alenemaan vaikuttaa todennäköisesti hienoimman uusiokiviaineslajitteen käyttö betonissa. Koemassassa 2 on käytetty ainoastaan karkeinta uusiokiviaineslajitetta, mutta uusiokiviaineksen kokonaisuus on tutkimuksen toiseksi suurin. Koebetoni 2:n puristuslujuus

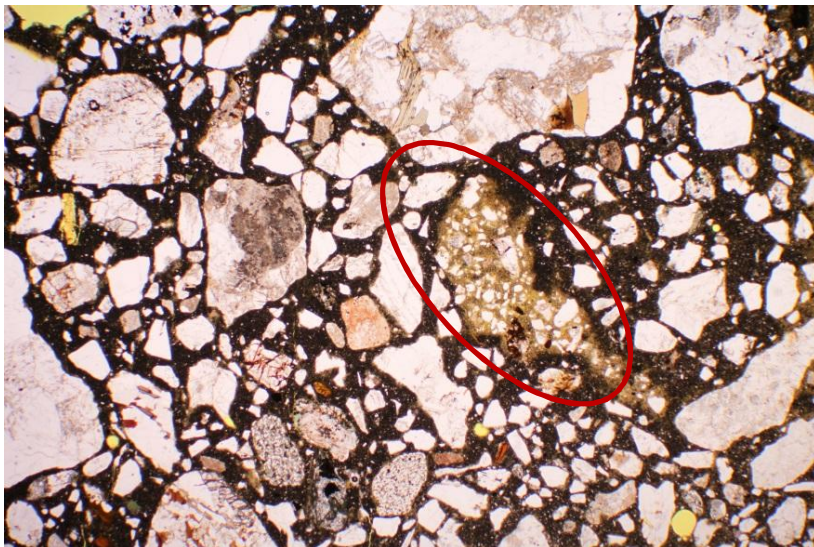
on paras testatuista uusiobetoneista. Tästä voidaan päätellä, että karkeaa kiviainesta voidaan käyttää suurinakin osuuksina uusiobetonissa, ilman että se heikentäisi merkittävästi betonin ominaisuuksia. Hyviä tuloksia on saatu myös koebetoneista, joissa on käytetty toiseksi karkeinta lajitetta (# 8–16 mm). Koetulosten perusteella uusiobetonin valmistuksessa on kannattavaa yhdistellä eri lajitteita eri prosenttiosuuksin.

Taivutuslujuustuloksista nähdään, että taivutuslujuus on vertailubetoniin verrattuna vähintään yhtä hyvä. Parantunut taivutuslujuus saattaa olla kiviainesrakeiden voimakkaamman tartuntavyöhykkeen ansiota. Kaikki koebetonit on valmistettu kaksivaiheisella sekoitusmenetelmällä, jossa sekä uusiokiviainekset että luonnonkiviainekset kostutetaan lisäämällä ennen sementtiä puolet massaan tarvittavasta vesimäärästä. Sekoitusmenetelmän pitäisi parantaa betonin ominaisuuksia, ja se voikin olla tekniikka, joka on vaikuttanut taivutuslujuuden paranemiseen.

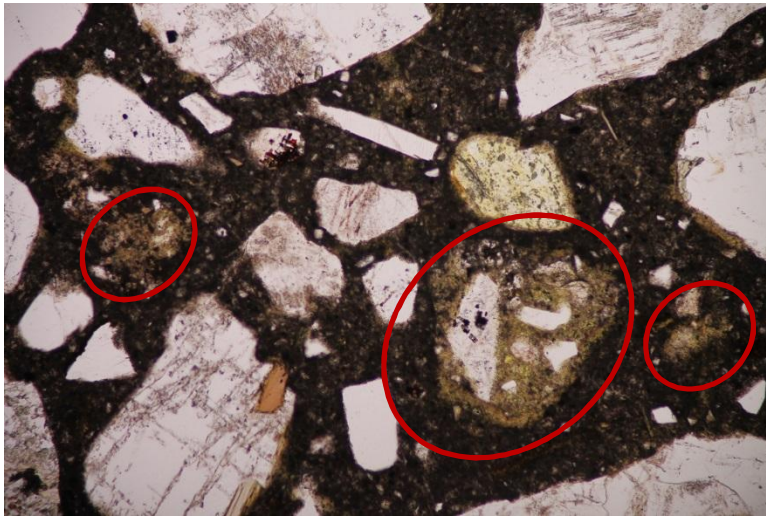
Mikroskooppisesti ohuthien avulla tutkituista näytteistä havaittiin, että vertailubetoni on hyvin tiivistynyt ja homogeeninen. Betonissa kiviaineksen ja sementtipastan keskinäinen jakautuma on tasainen. Myös koebetonien koostumus on tiivis ja homogeeninen. Uusiokiviainesrakeiden havainnointi betonissa on paikoin jopa haastavaa, koska niiden rajapinta ei ole aina selvästi erotettavissa, varsinkaan silloin kun tartuntavyöhyke on luja. Mikroskoopilla uusiobetonია tutkittaessa, erottuu huonolaatuinen uusiokiviaines erityisen selvästi. Kuvissa 27–29 on esitetty mikroskooppikuvia ohuthieistä. (Pyy 2015.)



Kuva 27. Vertailubetoni on koostumukseltaan tiivistä ja homogeenista. Kiviaineksen ja sementtipastan jakautuma on tasainen. Kuvassa kiviainesrakeet näkyvät vaaleana, tumma alue on sementtipastaa, ja keltaiset kohdat kuvaavat huokosia (ilmaa). Kuvan lyhyt sivu vastaa näytteessä 7 mm.

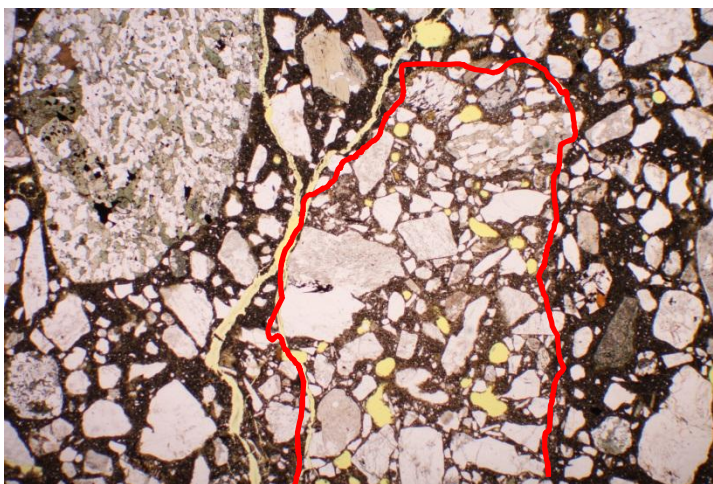


Kuva 28. Koebetonin 2 koostumus on hyvin vertailubetonin kaltainen. Uusiokiviainesrakeen erottaa sen erilaisen koostumuksen (esimerkiksi tiiveys) perusteella, jolloin se on väriltään sementtipastaa vaaleampi (ympyröity kuvaan). Kuvan lyhyt sivu vastaa näytteessä 7 mm.



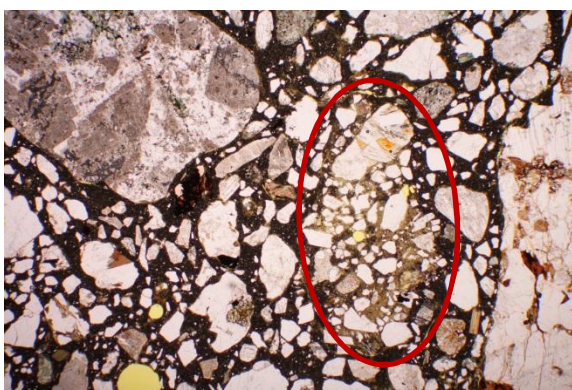
Kuva 29. Koebetonissa 5 on käytetty myös hienointa lajitetta, joten uusiokiviainesraakeita on vaikea havaita näytteestä. Kuvaan ympyröity kolme todennäköisesti alle 0,5 mm:n uusiokiviainesraetta. Kuvan lyhyt sivu on 1,5 mm näytteessä.

Ohuthieet tehtiin koekappaleista, joille oli jo tehty lujuuskokeet. Näin ollen ohuthienäytteissä havaittiin myös halkeamia. Halkeamien suuntautumista arvioitiin mikroskooppisesti. Koebetonin 2 näytteessä havaittiin suurehko lujuuskokeista aiheutunut halkeama. Kyseinen halkeama kulkee koekappaleessa mielivaltaisesti, eikä esimerkiksi uusiokiviainesrakeen ja sementtipastan välistä rajapintaa pitkin. Näin ollen voidaan olettaa, että tartuntavyöhyke on luja. Kyseinen halkeama on esitetty kuvassa 31.

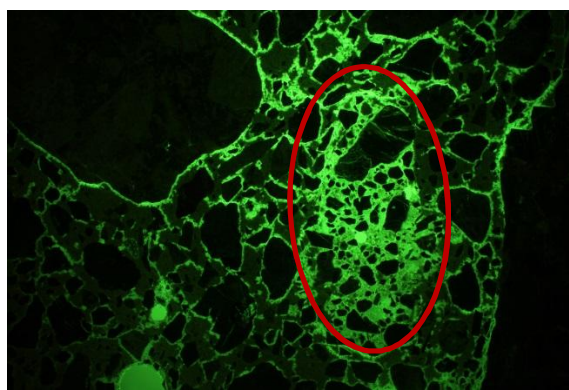


Kuva 30. Koebetonissa 2 havaittu halkeama kulkee mielivaltaisesti, eikä vain uusiokiviaineksen ja sementtipastan välistä rajapintaa pitkin (merkitty punaisella). Kuvan lyhyt sivu vastaa näytteessä 7 mm.

Ohuthienäytteistä havaittiin, että osa uusiokiviainesrakeista istuu erittäin hyvin uusiobetoniin, mikä on selvästi havaittavissa fluoresenssivalossa. Hyvin betoniin istuvissa uusiokiviainesrakeissa tartuntavyöhyke sementtipastan kanssa on hyvä. Fluoresenssivalossa havaittaisiin, mikäli uusiokiviaineen pinnalle on jäänyt vapaata vettä, tai mikäli uusiokiviaines olisi imenyt vettä sementtipastasta. Molemmat ilmiöt heikentäisivät uusiobetonin laatua ja tartuntavyöhykkeen lujuutta. Varsinkin koebetonissa 4 havaittiin useita hyvin istuvia uusiokiviainesrakeita. Tästä esimerkkeinä ovat kuvat 32 ja 33. (Pyy 2015)



Kuva 31. Koemassassa 4 havaittiin hyvin betoniin istuva uusiokiviainesrae (ympyröity kuvaan). Kuvan lyhyt sivu vastaa näytteessä 7 mm.



Kuva 32. Viereistä kuvaa vastaava mikroskooppikuva fluoresenssivalossa, mistä havaitaan, että uusiokiviaineen ja sementtipastan välinen tartunta on hyvä.

Yhteenvetona todetaan, että parhaat uusiobetonin ominaisuudet vertailubetoniin verrattuna ovat koebetoneilla 2, 3 ja 4. Koebetonissa 2 uusiokiviaineksella on korvattu 12,5 % luonnonkiviainesmäärästä, mikä on tutkimuksen toiseksi korkein prosenttiosuus. Koebetoni 2:n valmistuksessa on käytetty ainoastaan karkeinta uusiokiviaineslajitetta (# 16–32 mm). Koebetonissa 3 uusiokiviaineksella on korvattu 5,1 % luonnonkiviainesmäärästä, mikä on tutkimuksen alhaisin prosenttiosuus, ja selittää osaltaan hyvin vertailubetonia vastaavat ominaisuudet. Koebetonin 3 valmistuksessa on käytetty kahta uusiokiviaineslajitetta, # 16–32 mm ja # 8–16 mm. Koebetoni 4 on hyvin koebetonin 3 kaltainen, mutta uusiokiviaineksella on korvattu 10,2 % luonnonkiviainesmäärästä, ja molempia lajitteiden määrää on lisätty saman verran.

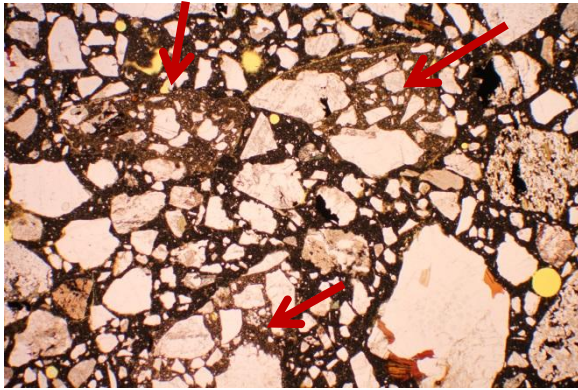
4.3 Tutkimustulosten hyödyntäminen uusiobetonin tuotannossa

Tässä diplomityössä on osoitettu, että uusiobetonin koostumuksen suunnittelulla ja tuotantoprosessia kehittämällä voidaan luotettavasti tuottaa laadukasta uusiobetonia. Uusiobetonin koostumuksen suunnittelun lähtökohtana ovat betonin vaatimukset ja tavoitellut ominaisuudet, kuten tavoitelujuus. Tavoitelujuuteen perustuen valitaan käytettävä uusiokiviaines siihen soveltuvasta laatuluokasta, jotka on esitetty tämän diplomityön luvussa 3.3.

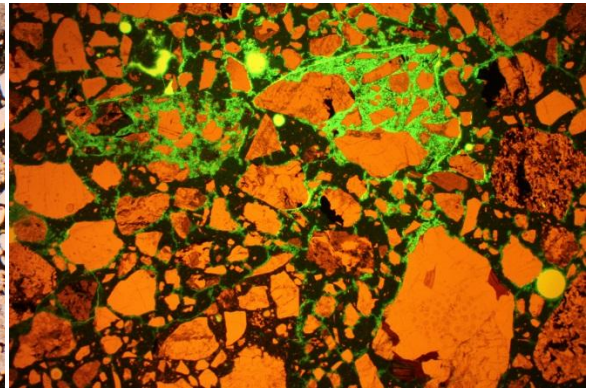
Uusiokiviaineen karkeimpien lajitteiden käyttö on suositeltavinta, koska niiden vaikutukset betonin ominaisuuksiin ovat pienemmät suhteessa hienoimpaan lajitteeseen. Tämän diplomityön kokeellisen vaiheen tulokset osoittavat, että uusiokiviaineella voidaan korvata luonnonkiviainesta lähes 15 %:n osuudella varsin vähäisellä laadun (mekaaniset ominaisuudet) heikkenemisellä. Tässä diplomityössä valmistettujen koebetonien uusiokiviaines oli luokittelematonta. Näin ollen luokitellun uusiokiviaineen käyttö luonnonkiviaineen korvaajana oletettavasti vaikuttaa ominaisuuksiin vielä vähemmän, tai mahdollisesti vaikutusta ei havaita.

Uusiobetonin valmistuksessa on suositeltavaa käyttää notkistinta, varsinkin käytettäessä uusiokiviaineen hienompia lajitteita. Notkistimen avulla parannetaan betonin työstettävyyttä vaikuttamatta kuitenkaan vesi-sideainesuhteeseen.

Uusiokiviaineen valmistuksessa laatuun voidaan vaikuttaa valmistusmenetelmän avulla. Uusiobetonin on suositeltavaa valmistaa kaksivaiheisen sekoitusmenetelmän avulla. Kaksivaiheinen sekoitusmenetelmä ja sen vaikutukset ominaisuuksiin on esitetty aiemmin tässä diplomityössä. Kaksivaiheisessa sekoitusmenetelmässä kiviainesten joukkoon sekoitetaan puolet massaan tarvittavan veden määrästä ennen sementin lisäystä. Mikäli mahdollista, suositellaan varata ensimmäisen veden lisäämisen jälkeen tasaantumisaika, jonka aikana kiviainesten kosteudet tasaantuvat ja vesi ehtii imeytymään uusiokiviainesrakeiden huokosiin. Kaksivaiheisen sekoitusmenetelmän etuna on se, että uusiokiviainespattikkeen pinnalla oleva kostunut vanha sementtipasta lujittuu sementin lisäyksen jälkeen. Näin ollen uusiokiviainesrakeen ja uuden sementtipastan välinen tartuntavyöhyke on luja. Kuvissa 34 ja 35 on esitetty uusiokiviaines, jossa tartuntarajapinta uusiobetonissa on erinomainen.



Kuva 33. Kolme betoniin hyvin istuvaa uusiokiviainesraetta tämän diplomityön koebetonissa 5. Uusiokiviainesrakeet betonissa merkitty nuolilla. Kuvan lyhyt sivu vastaa näytteessä 7 mm. (Pyy 2015)



Kuva 34. Viereistä kuvaa vastaava mikroskooppikuva fluoresenssivalossa, mistä havaitaan, että uusiokiviaineksen ja sementtipastan välinen tartunta on hyvä (Pyy 2015).

5 Johtopäätökset

Betonin kierrätystä ja hyötykäyttöä Suomessa on kehitettävä. Useissa Euroopan maissa murskatun betonin käyttö uusiokiviaineksena on tavanomaista. Suomessa betonimurske hyödynnetään maarakennustarkoitukseen, mutta koska betonimurskeen laatu ja lujuusominaisuudet ovat hyvät, sen hyödyntäminen uusiobetonin valmistuksessa on järkevää ja suositeltavaa. Betoni saadaan siten uusiomateriaalina takaisin kiertoon. Uusiokiviaineksella voidaan korvata uusiutumattomia luonnonkiviainesvaroja ja mahdollisesti myös vähentää betoninvalmistuksessa käytettävän sementin määrää.

Tässä diplomityössä betonisen purkujätteen laatua määritettiin kahdesta eri purettavasta rakennuksesta ja molemmissa rakennuksissa betonirakenteiden lujuudet olivat odotetusti hyviä. Uusiobetonin ominaisuuksiin vaikuttaa lähdemateriaalin eli purkubetonin laatu. Purettavien rakennusten betonirakenteiden lujuuden määrittämisellä, voidaan laatia purkujätteelle luokittelu, jonka mukaan uudelleenkäyttöön soveltuva materiaali jaotellaan. Betoniselle purkujätteelle on kolme luokkaa, ja ne perustuvat alkuperäisen rakenteen lujuusluokkiin. Luokkaan 1 kuuluvat korkealujuuksiset (yli 45 N/mm^2) betoniset purkujätteet, luokkaan 2 keskiluokan ($30\text{--}45 \text{ N/mm}^2$) betoniset purkujätteet ja luokkaan 3 alhaisen lujuuden (alle 30 N/mm^2) betoniset purkujätteet. Ennen lujuusluokitusta täytyy varmistaa, että purkubetoni on uudelleenkäyttökelpoista myös muilta osin, esimerkiksi jätteen mahdollinen haitallisuus on arvioitava.

Purkujätteestä valmistetaan murskaamalla uusiokiviainesta. Uusiokiviaines murskataan siten, että eri lujuusluokkien murskeet ovat erilleen jaoteltuina. Murskausprosessin yhteydessä murskeesta poistetaan epäpuhtaudet ja metallit. Murskauksen lopuksi murske seulotaan fraktioihin # 16–32 mm, # 8–16 mm ja # 0–8 mm.

Uusiokiviaineksen ominaisuudet poikkeavat luonnonkiviaineksesta, koska uusiokiviainespattikkeli koostuu alkuperäisen kiviaineksen lisäksi sementtipastasta. Koska uusiokiviaines sisältää huokoista sementtipastaa, sen tiheys on alhaisempi ja vedenimukyky suurempi kuin luonnonkiviaineksessa. Uusiokiviaineksen vedenimukykyä pyritään hallitsemaan betonia valmistettaessa esimerkiksi esikostuttamalla. Kostuttamisella voidaan kuitenkin saada myös negatiivisia vaikutuksia uusiobetonin ominaisuuksiin, koska liian kostean uusiokiviaineksen ja uuden sementtipastan välinen tartunta voi muodostua heikoksi.

Hyviä tuloksia uusiokiviaineksen vedenimukyvyn hallintaan on saatu betonin valmistusta muuttamalla siten, että sekoitus toteutetaan kaksivaiheisena. Betoniin laskettu vesimäärä lisätään kahdessa erässä siten, että puolet vedestä lisätään, kun uusiokiviainekset ja luonnonkiviainekset on sekoittimessa, mutta sementtiä ei vielä ole lisätty. Kiviainesten joukkoon lisättävä vesi tasaa kiviainesten kosteuseroa ja veden imeytyminen huokoisen uusiokiviaineksen pinnalle täyttää sen huokoiset. Sementin lisäys kostean uusiokiviaineksen joukkoon saa aikaan se, että uusiokiviaineksen ja uuden sementtipastan välinen tartunta muodostuu lujaksi.

Tässä diplomityössä valmistettiin vertailubetonin lisäksi viisi koebetonia. Betonin koostumus suunniteltiin pohjautuen Ruskon Betoni Oy:ltä saatuun kaupalliseen C-luokan rakennebetoniin, jonka tavoitelujuus oli 30 N/mm^2 . Koebetonit valmistettiin siten, että alhaisimmillaan uusiokiviaineksella korvattiin 5,1 % ja korkeimmillaan 13,8 % luonnonkiviaineksesta. Koebetonien suunnittelussa painotettiin karkeimpien lajitteiden käyttöä, koska niiden käytöstä on yleisesti paremmat kokemukset, ja tavoitteena on löytää mahdollisimman hyvin tuotantoon sopiva betoniresepti. Koebetoneissa 1 ja 2 korvattiin ainoastaan karkeinta lajitetta (# 16–32 mm), koebetoneissa 3 ja 4 korvattiin kahta karkeinta lajitetta (# 16–32 mm ja # 8–16 mm) sekä koebetonissa 5 edellisten lisäksi hienointa lajitetta (# 0–8 mm).

Koebetonin ominaisuuksia tutkittiin standardin mukaisin määrityksin ja todettiin, että betonin ominaisuudet koebetoneiden ja vertailubetonin välillä eivät merkittävästi muuttuneet. Koebetoneista parhaimmat tulokset saatiin koebetoneille 2, 3 ja 4. Hienoimman lajitteen käyttö vaikutti eniten lujuuteen sekä tuoreen betonin ominaisuuksiin. Tavoitelujuus kuitenkin täyttyi kaikilla koebetoneilla. Koebetoneiden ominaisuudet eivät juurikaan poikenneet vertailubetonista, eli luonnonkiviaineksella tehdystä normaalista K30-rakennebetonista, ja ne olivat laadultaan hyviä.

Diplomityön tuloksena todetaan, että murskatun betonin hyödyntäminen betonin valmistamista on mahdollista. Valmistusprosessia kehittämällä voidaan vaikuttaa positiivisesti uusiobetonin ominaisuuksiin. Purkujätteen ja sitä kautta uusiokiviaineksen laatu- luokittelu parantaa mahdollisuuksia hyödyntää uusiokiviainesta myös korkeamman vaatimustason betonien valmistuksessa.

Jatkotutkimustarpeet

Jatkotutkimustarpeena on uusiobetonin laadun ja prosessin kehittämiseen liittyvät tutkimusaiheet. On tutkittava hyvälaatuisen uusiokiviaineksen hyödyntämistä rakennebetoneissa, joissa on korkeammat laatuvaatimukset kuin tässä työssä tutkitussa C-luokan rakennebetonissa, jotta voidaan varmistua siitä, että jätteen luokittelusta ja lajittelusta on hyötyä lopputuotteen ominaisuuksia ajatellen.

Toisaalta viranomaisten asettamat vaatimukset ja rajoitukset betonimurskeen käytölle on selvitettävä, ja tarvittaessa tutkimuksiin perustuen arvioitava uudelleen paremman jätteen hyötykäytön sallimiseksi.

Uusiobetonin tuotantoprosessin kehittämiseksi tulee tehdä jatkotutkimuksia. Uusiobetonin laadun varmistamiseksi tuotantoprosessissa tärkeää on hallittavuus ja toistettavuus.

Kaikki tässä työssä tutkitut koebetonit täyttivät ennalta asetetut vaatimukset, joten lisätutkimuksissa uusiokiviainesta voitaisiin kokeilla korvata vielä suuremmilla prosentiosuuksilla ja karkeimpia lajitteita painottaen.

Lisätutkimuksissa olisi tärkeää määrittää uusiobetonin säilyvyysominaisuuksia Suomen olosuhteissa ja tutkia esimerkiksi pakkasenkestävyyden parantamista huokostuksen avulla. Uusiobetonin pitkäaikaisominaisuuksia, kuten kutistumaa, virumaa ja lujuudenkehitystä, verrattuna tavanomaiseen betoniin olisi myös tärkeää tutkia.

Lähdeluettelo

Barbudo, A., de Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M., Agrela, F. 2013. Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. *Journal of cleaner production*. Vol. 59. S. 92–98.

Betonikeskus ry. 2005. Betonin, betonilietteen ja veden kierrätys betoniteollisuudessa. Helsinki: Suomen betonitieto. 126 s. ISBN: 952-5075-69-9.

BY 43 Betonin kiviainekset 2008. 2009. Helsinki: Suomen Betonitieto. 58 s. ISBN 978-952-5075-99-1.

BY 50 Betoninormit 2012. 2011. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys. 251 s. ISBN 978-952-67169-5-4.

De Brito, J. & Saikia, N. 2013. Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste. London, United Kingdom: Springer Verlag. 452 s. ISBN 978-1-4471-4539-4 (sähköinen).

De Oliveira, M. B., Vazquez, E. 2011. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste management*. Vol. 16:1. S. 113–117.

Dhir, R. K. & Paine, K. A. 2007. Performance related approach to the use of recycled aggregates. Waste and Resources Action Programme (WRAP), Aggregates Research Programme. 77 s. ISBN: 1-84405-302-4.

Equchi, K., Teranishi, K., Nakagome, A., Kishimoto, H., Shinozaki, K., Narikawa, M. 2007. *Construction & building materials*. Vol. 21:7. S. 1542–1551.

Euroopan parlamentin ja neuvosten direktiivi 2008/98/EY, annettu 19 päivänä marraskuuta 2008, jätteistä ja tiettyjen direktiivien kumoamisesta; OJ, N:o L 312, 22.11.2008, s. 3-30 (FI). [viitattu: 26.10.2015]. Saantitapa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex:32008L0098>.

Etzeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M. 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 37:5. S. 735–742.

Ferreira, L., de Brito, J., Barra M. 2011. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*. Vol. 63:8. S. 617–627.

JL 646/2011. Jätelaki. Annettu Helsingissä 17.6.2011.

Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., Hisada, M. 2004. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*. Vol. 34:6. S. 965–971.

Newman, J., Choo, B. S. 2003. *Advanced concrete technology*. Vol. 3, Processes. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, Butterworth-Heinemann. 448 s. ISBN: 0-7506-5105-9.

Obla, K., Kim, H., Lobo, C. 2007. Crushed Returned Concrete as Aggregate for New Concrete. Final Report to the RMC Research and Education Foundation. Saantitapa: http://hoggreadymix.com/cms/ReadyMixfiles/PDF/Sustainability/Crushed_Retuned_Concrete_Aggregates.pdf

Pajukallio, A-M., Wahlström, M., Alasaarela, E. 2011. Maarakentamisen uusiomateriaalit; Ympäristökelpoisuuden osoittaminen ja tuotteistaminen. Ympäristöministeriön raportteja 11/2011. Helsinki: Ympäristöministeriö. ISBN: 978-952-11-3862-1.

Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., Kou, S. C. 2004. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and concrete research*. Vol. 34:1. S. 31–36.

Pyy, H. 2015. Vahanen Oy, Espoo. Haastattelu 2.11.2015.

Serpa, D., de Brito, J., Pontes, J. 2015. Concrete Made with Recycled Glass Aggregates: Mechanical Performance. *Materials Journal*. Vol. 112:1. S. 29–38.

SFS 5884. 2001. Betonimurskeen maarakennuskäytön laadunhallintajärjestelmä. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 16 s.

SFS-EN 1097-6:en. 2014. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintotiheyden ja vedenimukyvyn määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 50 s.

SFS-EN 12350-2. 2009a. Tuoreen betonin testaus. Osa 2: Painuma. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 8 s.

SFS-EN 12350-6. 2009b. Tuoreen betonin testaus. Osa 6: Tiheys. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 9 s.

SFS-EN 12350-7. 2009c. Tuoreen betonin testaus. Osa 7: Ilmamäärä. Painemenetelmät. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 18 s.

SFS-EN 12390-1:en. 2013a. Kovetteen betonin testaus. Osa 1: Muoto, mitat ja muut vaatimukset koekappaleille ja muoteille. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 14 s.

SFS-EN 12390-2. 2013b. Kovetteen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 7 s.

SFS-EN 12390-3. 2009d. Kovetteen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 18 s.

SFS-EN 12390-5. 2009e. Kovetteen betonin testaus. Osa 5: Koekappaleiden taivutuslujuus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 9 s.

SFS-EN 12504-1. 2009f. Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut rakennekoekappaleet. Näytteenotto, tutkiminen ja puristuslujuuden testaus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 10 s.

SFS-EN 12620 + A1. 2008a. Betonikiviainekset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 50 s.

SFS-EN 13242 + A1. 2008b. Maa- ja vesirakentamisessa ja tienrakenteissa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 39 s.

Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto [verkkojulkaisu]. ISSN=1798-3339. 2013. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 26.10.2015].
Saantitapa: http://www.stat.fi/til/jate/2013/jate_2013_2015-05-28_tie_001_fi.html

Söderholm, P. 2011. Taxing virgin natural resources: Lessons from aggregates taxation in Europe. *Resources, conservation, and recycling*. Vol. 55:11. S. 911–922.

Tabsh, S. W., Abdelfatah, A. S. 2009. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 23:2. S. 1163–1167.

Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M. 2005. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*. Vol. 35:6. S. 1195–1203.

Tam, V. W. Y., Tam, C. M. 2007. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of materials science*. Vol. 42:10. S. 3592–3602.

Tam, V.W.Y., Tam, C.M., Wang, Y. 2007. Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. *Construction & building materials*. Vol. 21:10. S. 1928–1939.

VNa 179/2012. Valtioneuvoston asetus jätteistä. Annettu Helsingissä 19.4.2012.

VNa 591/2006. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Annettu Helsingissä 28.6.2006.

YSL 527/2014. Ympäristönsuojelulaki. Annettu Helsingissä 27.6.2014.

Liiteluettelo

Liite 1. Rakennekoekappaleiden mittaukset ja tulokset. 1 sivu.

Liite 2. Betonimurskeen ominaisuudet. 1 sivu.

Liite 3. Luonnonkiviainesten rakeisuudet. 1 sivu.

Liite 4. Kiviainesten yhdistäminen. 1 sivu.

Liite 5. Betonien koostumukset. 3 sivua.

Liite 6. Betonien lujuustulokset. 2 sivua.

Liite 1. Rakennekoekappaleiden mittaukset ja tulokset

Rakennekoekappaleiden puristuslujuudet									
	Testauspäivämäärä:	27.5.2015							
Tunniste	Rakenne	pituus	halkaisija	massa	tiheys	kuorma max	lujuus N/mm ²	lujuuden keskiarvo	suunnittelu- lujuus
		mm	mm	g	kg/dm ³	kN			
A-1-1	seinä	87,0	84,5	1116	2,29	241,0	43,0	40,9	
A-1-2	seinä	85,5	84,5	1114	2,32	220,0	39,2		
A-1-3	seinä	87,0	84,5	1126	2,31	252,4	45,0		
A-1-4	seinä	83,8	84,5	1115	2,37	203,8	36,4		
A-2-1	välipohja	87,0	84,5	1135	2,33	198,4	35,4		
A-2-2	välipohja	85,9	84,5	1103	2,29	184,6	32,9		
A-2-3	välipohja	86,5	84,5	1127	2,32	174,7	31,2		
A-3-1	elementin sisäkuori	86,4	84,5	1134	2,34	266,2	47,5		
A-3-2	elementin sisäkuori	86,3	84,5	1130	2,34	224,8	40,1		
A-3-3	elementin sisäkuori	86,3	84,5	1137	2,35	223,9	39,9		
							Rak A	39,1	
B-1-1	elementin sisäkuori	50,0	50,0	231	2,36	71,3	36,3	33,8	BK 300
B-1-2	elementin sisäkuori	50,5	50,0	236	2,38	66,3	33,7		
B-1-3	elementin sisäkuori	51,5	50,0	235	2,32	46,0	23,4		
B-1-4	elementin sisäkuori	51,5	50,0	240	2,38	81,7	41,6		
B-2-1	alapohja	52,0	50,0	237	2,32	98,9	50,4	40,3	
B-2-2	alapohja	53,0	50,0	248	2,39	88,7	45,2		
B-2-3	alapohja	53,0	50,0	234	2,25	71,1	36,2		
B-2-4	alapohja	51,5	50,0	233	2,31	57,6	29,3		
B-3-1	pilari	51,5	50,0	241	2,38	42,3	21,6	39,9	AK 400
B-3-2	pilari	51,0	50,0	239	2,39	84,6	43,1		
B-3-3	pilari	51,5	50,0	247	2,44	93,0	47,4		
B-3-4	pilari	52,0	50,0	245	2,39	93,0	47,4		
B-4-1	palkki	53,0	50,0	255	2,45	70,8	36,0		AK 500
B-4-2	palkki	52,5	50,0	248	2,41	104,7	53,3		
							Rak B	38,9	

Liite 2. Betonimurskeen ominaisuudet

Murskeen vedenimukyyn määrittäminen								
Anna-Maria Nieminen, 7.10.2014						m(k)	kosteapaino	
						m(t)	kuivapaino	
		18.9.2014	3.10.2014	6.10.2014				
Nro	Tiedot	m(alussa)	m(k)	m(t)	m(k)-m(t)	vedenimukyky		
1	kuiva, vaalea	224,22	234,91	210,59	24,32	11,55 %	13,63	6,47 %
2	kuiva, tumma	480,4	483,98	470,98	13	2,76 %	9,42	2,00 %
3	kasakostea, va	494,77	499,3	463,11	36,19	7,81 %	31,66	6,84 %
4	kasakostea, va	297,78	301,42	286,87	14,55	5,07 %	10,91	3,80 %
5	kasakostea, tu	567,2	568,84	524,12	44,72	8,53 %	43,08	8,22 %
					keskiarvo	7,15 %		
Murskeen vedenimukyyn määrittäminen								
Anna-Maria Nieminen, 23.12.2014						m(k)	kosteapaino	
						m(t)	kuivapaino	
Nro	Tiedot	m(alussa)	m(k)	m(t)	m(k)-m(t)	vedenimukyky		
1	8-16	41,39	43,19	40,22	2,97	7,38 %	1,17	2,91 %
2	16-32	112,65	116,41	109,83	6,58	5,99 %	2,82	2,57 %
Kiviainesten kosteuspitoisuus:								
Anna-Maria Nieminen, 2.4.2015								
	alkupaino, tasapainotila	kuivana	erotus					
NA 5-10	473,62	472,5	1,12	0,24 %				
NA hieno	295,53	294,8	0,73	0,25 %				
RCA 0-8	1058,85	1040,95	17,9	1,72 %				
RCA 8-16	747,58	738,8	8,78	1,19 %				
RCA 16-32	900,76	892,44	8,32	0,93 %				
Kiviainesten tiheydet								
Anna-Maria Nieminen, 2.4.2015								
	massa	tilavuus	tiheys					
	g	cm ³	Mg/m ³					
RCA 0-8	112,03	46	2,435435					
RCA 8-16	142,2	58	2,451724					
RCA 16-32	117,45	48	2,446875					
NA 5-10	122	46	2,652174					

Liite 3. Luonnonkiviainesten rakeisuudet

	<u>Aggregates, grading</u>									
	<u>Runkoainekomponenttien rakeisuustiedot</u>									
Sieve/Seula mm	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64
AGGREGATES										
FILLER I, Astara	68,9	89,7	96,5	98,9	99,4	99,7	100	100	100	100
0,1 - 0,6	4	30	88	100	100	100	100	100	100	100
0,5 - 1,2	0	3	23	96	100	100	100	100	100	100
1 - 2	0	0	1	13	86	100	100	100	100	100
2 - 5	0	0	0	0	1	40	100	100	100	100
5 - 10	0	0	0	0	0	2	48	100	100	100
8 - 16	0	0	0	0	0	0	5	96	100	100

16–32 mm:

Kiviainekset	Humus	Liete	Rakeisuus										H
			0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	
Tunnus													
filleri			44,0	77,0	89,0	94,0	96,0	98,0	100	100	100	100	898
0-8			4,0	11,0	23,0	45,0	69,0	83,0	98	100	100	100	633
8-16			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	8	96	100	100	305
16-32			1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	3	18	98	100	222

Liite 4. Kiviainesten yhdistäminen

[illegible]

Liite 5. Betonien koostumukset

Vertailumassa												
Ainesosat	Suhteitusseos						Kivi- ja lisäaineiden vesipitoisuus				Työseos	ANNOS
	kg/m3		%	dm3/m3	tiheys	kg/m3	kokonais	absorboituva	vapaa	vapaa		0,055
							%	%	%	kg	kg/m3	
Sementti	330		-	106	3,10	330	-	-	-	-	330	18,15
Kiviaines	1825	a	16,0 %	109	2,67	292			0,20	0,6	292,6	16,09
		b	12,0 %	82	2,67	219			0,20	0,4	219,4	12,07
		c	18,0 %	123	2,67	329			0,20	0,7	329,2	18,10
		d	14,0 %	96	2,67	256			0,20	0,5	256,0	14,08
		e	12,0 %	82	2,67	219			0,20	0,4	219,4	12,07
		f	11,0 %	75	2,67	201			0,20	0,4	201,2	11,06
		g	17,0 %	116	2,67	310			1,00	3,1	313,4	17,23
Uusiokiviaines		RCA1										
		RCA2										
		RCA3										
Vesi+abs.	190			190	1,00	190				6,1	184	10,11
Ilma	20			20	-	-						
Yhteensä	2345			1000		2345					2345	

Koemassa 1												
Ainesosat	Suhteitusseos						Kivi- ja lisäaineiden vesipitoisuus				Työseos	ANNOS
	kg/m3		%	dm3/m3	tiheys	kg/m3	kokonais	bsorboituv	vapaa	vapaa		0,055
							%	%	%	kg	kg/m3	
Sementti	330		-	106	3,10	330	-	-	-	-	330	18,15
Kiviaines	1825	a	16,0 %	109	2,67	292			0,20	0,6	292,6	16,09
		b	12,0 %	82	2,67	219			0,20	0,4	219,4	12,07
		c	18,0 %	123	2,67	329			0,20	0,7	329,2	18,10
		d	14,0 %	96	2,67	256			0,20	0,5	256,0	14,08
		e	12,0 %	82	2,67	219			0,20	0,4	219,4	12,07
		f	11,0 %	75	2,67	201			0,20	0,4	201,2	11,06
		g	17,0 %	70	2,67	186			1,00	1,9	187,9	10,33
Uusiokiviaines		RCA1										
		RCA2										
		RCA3	40% g:stä	46	2,40	111	124,00		1,00	1,1	112,6	6,19
Vesi+abs.	190			190	1,00	190				6,0	184	10,12
Ilma	20			20	-	-						
Yhteensä	2345			1000		2332					2332	

USÄVESI:
3 %
0,185749

10,31

Koemassa 2												
Ainesosat	Suhteitusseos						Kivi- ja lisäaineiden vesipitoisuus				Työseos	ANNOS
							kokonais	osorboitu	vapaa	vapaa		0,055
	kg/m3		%	dm3/m3	tiheys	kg/m3	%	%	%	kg	kg/m3	
Sementti	330		-	106	3,10	330	-	-	-	-	330	18,15
Kiviaines	1825	a	16,0 %	109	2,67	292			0,20	0,6	292,6	16,09
		b	12,0 %	82	2,67	219			0,20	0,4	219,4	12,07
		c	18,0 %	123	2,67	329			0,20	0,7	329,2	18,10
		d	14,0 %	96	2,67	256			0,20	0,5	256,0	14,08
		e	12,0 %	82	2,67	219			0,20	0,4	219,4	12,07
		f	11,0 %	75	2,67	201			0,20	0,4	201,2	11,06
		g	17,0 %	23	2,67	62			1,00	0,6	62,6	3,44
Uusiokiviaines		RCA1										
		RCA2										
		RCA3	80% g:stä	93	2,40	223	248,00		1,00	2,2	225,2	12,38
Vesi+abs.	190			190	1,00	190				5,9	184	10,13
Ilma	20			20	-	-						
Yhteensä	2345			1000		2320					2320	

USÄVESI:	4 %
0,495331	
10,62	

USÄVESI:
4 %
0,495331
10,62

Koemassa 3												
Ainesosat	Suhteitusseos						Kivi- ja lisäaineiden vesipitoisuus				Työseos	ANNOS
	kg/m3		%	dm3/m3	tiheys	kg/m3	kokonais	osorboitu	vapaa	vapaa		0,055
							%	%	%	kg	kg/m3	
Sementti	330		-	106	3,10	330	-	-	-	-	330	18,15
Kiviaines	1825	a	16,0%	109	2,67	292			0,20	0,6	292,6	16,09
		b	12,0%	82	2,67	219			0,20	0,4	219,4	12,07
		c	18,0%	123	2,67	329			0,20	0,7	329,2	18,10
		d	14,0%	96	2,67	256			0,20	0,5	256,0	14,08
		e	12,0%	82	2,67	219			0,20	0,4	219,4	12,07
		f	11,0%	60	2,67	161			0,20	0,3	160,9	8,85
		g	17,0%	93	2,67	248			1,00	2,5	250,5	13,78
Uusiokiviaines		RCA1										
		RCA2	20% f:stä	15	2,40	36	40,15		1,00	0,4	36,5	2,00
		RCA3	20% g:stä	23	2,40	56	62,00		1,00	0,6	56,3	3,10
Vesi+abs.	190			190	1,00	190				6,3	184	10,10
Ilma	20			20	-	-						
Yhteensä	2345			1000		2334					2334	

USÄVESI:
4 %
0,080192
0,123833

10,30

USÄVESI:
4 %
0,080192
0,123833

Koemassa 4												
Ainesosat	Suhteitusseos						Kivi- ja lisäaineiden vesipitoisuus				Työseos	ANNOS
							kokonais	psorboitu	vapaa	vapaa		0,055
	kg/m3		%	dm3/m3	tiheys	kg/m3	%	%	%	kg	kg/m3	
Sementti	330		-	106	3,10	330	-	-	-	-	330	18,15
Kiviaines	1825	a	16,0 %	109	2,67	292			0,20	0,6	292,6	16,09
		b	12,0 %	82	2,67	219			0,20	0,4	219,4	12,07
		c	18,0 %	123	2,67	329			0,20	0,7	329,2	18,10
		d	14,0 %	96	2,67	256			0,20	0,5	256,0	14,08
		e	12,0 %	82	2,67	219			0,20	0,4	219,4	12,07
		f	11,0 %	45	2,67	120			0,20	0,2	120,7	6,64
		g	17,0 %	70	2,67	186			1,00	1,9	187,9	10,33
Uusiokiviaines		RCA1			2,40							
		RCA2	40% f:stä	30	2,40	72	80,30		1,00	0,7	72,9	4,01
		RCA3	40% g:stä	46	2,40	111	124,00		1,00	1,1	112,6	6,19
Vesi+abs.	190			190	1,00	190				6,6	183	10,09
Ilma	20			20	-	-						
Yhteensä	2345			1000		2324					2324	

4 %

0,160383

0,247666

10,50

Koemassa 5												
Ainesosat	Suhteitusseos								Vesipitoisuus		Työseos	ANNOS
	kg/m3		%	dm3/m3	tiheys	kg/m3			vapaa	vapaa		0,055
									%	kg	kg/m3	
Sementti	330		-	106	3,10	330	-	-	-	-	330	18,15
							1,00	1182,60				
Kiviaines	1825	a	16,0 %	109	2,67	292	0,22	262,80	0,20	0,5	263,3	14,48
		b	12,0 %	82	2,67	219	0,17	197,10	0,20	0,4	197,5	10,86
a-e yht.	1314	c	18,0 %	123	2,67	329	0,25	295,65	0,20	0,6	296,2	16,29
90 %	1182,6	d	14,0 %	96	2,67	256	0,19	229,95	0,20	0,5	230,4	12,67
		e	12,0 %	82	2,67	219	0,17	197,10	0,20	0,4	197,5	10,86
		f	11,0 %	75	2,67	201		120,45	0,20	0,2	120,7	6,64
		g	17,0 %	116	2,67	310		248,20	1,00	2,5	250,7	13,79
Uusiokiviaines		RCA1	10% a-e:stä	49	2,40	118	131,40		1,00	1,2	119,2935	6,56
		RCA2	40% f:stä	30	2,40	72	80,30		1,00	0,7	72,9	4,01
		RCA3	20% g:stä	23	2,40	56	62,00		1,00	0,6	56,3	3,10
Vesi+abs.	190			190	1,00	190				7,5	182	10,03
Ilma	20			20	-	-						
Yhteensä	2345			1102		2591					2317	

LISÄVESI:

5 %

0,328057

0,200479

0,154791

10,72

Liite 6. Betonien lujuustulokset

Vertailubetoni																	
TESTAUS: 13.5.2015, ikä 29d																	
Taivutuslujuus:										Puristuslujuus:							
	massa	leveys(\	korkeus	pituus	tilavuus	tiheys	F(max)	σ(M)		l	b	h	pinta-ala	F(max)	lujuus		
	g	mm	mm	mm	m3	kg/m3	kN	N/mm2		mm	mm	mm	mm2	kN	N/mm2		
VA	28580	153	151	532	0,01229	2325,3	40,85			VA1	153	150	151	22950	770	33,6	
								5,27		VA2	153	150	151	22950	859	37,4	
VB	28740	153	151	531	0,01227	2342,7	37,24			VB1	153	150	151	22950	793	34,6	
								4,8		VB2	153	150	151	22950	859	37,4	
VC	28550	152	151	531	0,01219	2342,6	34,18			VC1	152,2	150	151	22830	825	36,1	
								4,44		VC2	152	150	150	22800	818	35,9	
VD	28390	152	150	531	0,01211	2345	36,24			VD1	152	150	151	22800	856	37,5	
								4,77		VD2	152	150	151	22800	826	36,2	
					keskiarvot	2338,9	37,128	4,82						825,75	36,1		

Koebetoni 1																
TESTAUS: 13.5.2015, ikä 28d																
Taivutuslujuus:									Puristuslujuus:							
	massa	leveys(\	korkeus	pituus	tilavuus	tiheys	F(max)	σ(M)		l	b	h	pinta-ala	F(max)	lujuus	
	g	mm	mm	mm	m3	kg/m3	kN	N/mm2		mm	mm	mm	mm2	kN	N/mm2	
1A	28560	152	150	530	0,01208	2363,5	39,45			1A1	152	150	150	22800	813,96	35,7
								5,19		1A2	152	150	150	22800	779	34,2
1B	28670	153	149	531	0,01211	2368,4	36,41			1B1	153	150	149	22950	758	33,0
								4,82		1B2	153	150	150	22950	748	32,6
1C	28650	153	150	531	0,01219	2351	35,04			1C1	153	150	149	22950	748	32,6
								4,58		1C2	153	150	150	22950	812	35,4
1D	28820	154	151	531	0,01235	2334	36,19			1D1	154	150	150	23100	793	34,3
								4,64		1D2	154	150	150	23100	778	33,7
					keskiarvot	2354,2	36,773	4,8075						778,75	33,9	

Koebetoni 2																
TESTAUS: 19.5.2015, ikä 29d																
Taivutuslujuus:									Puristuslujuus:							
	massa	leveys(\	korkeus	pituus	tilavuus	tiheys	F(max)	σ(M)		l	b	h	pinta-ala	F(max)	lujuus	
	g	mm	mm	mm	m3	kg/m3	kN	N/mm2		mm	mm	mm	mm2	kN	N/mm2	
2A	28600	153	149	531	0,01211	2362,6	40,28			2A1	153	150	149	22950	791	34,5
								5,34		2A2	153	150	150	22950	776	33,8
2B	28530	153	149	531	0,01211	2356,8	36,81			2B1	153	150	149	22950	806	35,1
								4,88		2B2	153	150	149	22950	872	38,0
2C	28660	154	150	531	0,01227	2336,5	38,3			2C1	154	150	150	23100	799	34,6
								4,97		2C2	154	150	149	23100	815	35,3
2D	28650	154	149	532	0,01221	2347	39,87			2D1	154	150	149	23100	733	31,7
								5,25		2D2	154	150	149	23100	867	37,5
					keskiarvo	2350,7	38,815	5,11							807,38	35,1

Koebetoni 3															
TESTAUS: 19.5.2015, ikä 28d															
<i>Taivutuslujuus:</i>								<i>Puristuslujuus:</i>							
	massa	leveys	korkeus	pituus	tilavuus	tiheys	F(max)	$\sigma(M)$		l	b	h	pinta-ala	F(max)	lujuus
	g	mm	mm	mm	m ³	kg/m ³	kN	N/mm ²		mm	mm	mm	mm ²	kN	N/mm ²
3A	28920	154	150	531	0,01227	2357,7	37,41			3A1	154	150	150	23100	840
								4,86		3A2	154	150	149	23100	787
3B	28760	153,5	149	532	0,01217	2363,6	42,44			3B1	153,5	150	149	23025	786
								5,6		3B2	153,5	150	149	23025	806
3C	28620	153	150	531	0,01219	2348,5	39,43			3C1	153	150	149	22950	771
								5,15		3C2	153	150	149	22950	828
3D	28710	153	150	531	0,01219	2355,9	36,68			3D1	153	150	149	22950	800
								4,8		3D2	153	150	149	22950	797
					keskiarvo	2356,4	38,99	5,1025						801,88	34,9

Koebetoni 4															
TESTAUS: 19.5.2015, ikä 28d															
<i>Taivutuslujuus:</i>								<i>Puristuslujuus:</i>							
	massa	leveys	korkeus	pituus	tilavuus	tiheys	F(max)	$\sigma(M)$		l	b	h	pinta-ala	F(max)	lujuus
	g	mm	mm	mm	m ³	kg/m ³	kN	N/mm ²		mm	mm	mm	mm ²	kN	N/mm ²
3A	28920	154	150	531	0,01227	2357,7	37,41			3A1	154	150	150	23100	840
								4,86		3A2	154	150	149	23100	787
3B	28760	153,5	149	532	0,01217	2363,6	42,44			3B1	153,5	150	149	23025	786
								5,6		3B2	153,5	150	149	23025	806
3C	28620	153	150	531	0,01219	2348,5	39,43			3C1	153	150	149	22950	771
								5,15		3C2	153	150	149	22950	828
3D	28710	153	150	531	0,01219	2355,9	36,68			3D1	153	150	149	22950	800
								4,8		3D2	153	150	149	22950	797
					keskiarvo	2356,4	38,99	5,1025						801,88	34,9

Koebetoni 5															
TESTAUS: 27.5.2015, ikä 28d															
<i>Taivutuslujuus:</i>								<i>Puristuslujuus:</i>							
	massa	leveys	korkeus	pituus	tilavuus	tiheys	F(max)	$\sigma(M)$		l	b	h	pinta-ala	F(max)	lujuus
	g	mm	mm	mm	m ³	kg/m ³	kN	N/mm ²		mm	mm	mm	mm ²	kN	N/mm ²
5A	28580	153	151	532	0,01229	2325,3	40,85			5A1	154	150	149	23100	778
								5,27		5A2	154	150	150	23100	786
5B	28740	153	151	531	0,01227	2342,7	37,24			5B1	154	150	149	23100	793
								4,8		5B2	154	150	148	23100	779
5C	28550	152	151	531	0,01219	2342,6	34,18			5C1	153	150	149	22950	758
								4,44		5C2	153	150	148	22950	821
5D	28390	152	150	531	0,01211	2345	36,24			5D1	154	150	149	23100	754
								4,77		5D2	154	150	149	23100	767
					keskiarvo	2338,9	37,128	4,82						779,5	33,8